

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zařízení na měření kroutícího momentu elektromotoru
Torque Measuring Device for Electric Motors

Student: Bc. Roman Fousek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Kubín, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Fousek**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství**
Specializace: **20 Výrobní stroje a zařízení**
Téma: **Zařízení na měření krouticího momentu elektromotoru**
Torque Measuring Device for Electric Motors

Zásady pro vypracování:

Navrhněte konstrukci testovacího modelu, který bude sloužit v laboratorních podmínkách pro definování momentových charakteristik motorů Leroy v zatěžovacím cyklu. Jedná se o speciální motory, které jsou součástí pumpy Edwards 12. Zatěžujícím prvkem v modelu bude samotná pumpa. Konstrukci navrhněte tak, aby bylo možné zařízení využít pro měření vibrací jednotlivých komponentů (motor, pumpa, spojka).

Seznam doporučené odborné literatury:

- KALAB, K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části spojovací*. 1. vydání VŠB-TU Ostrava, 2007, 91s. ISBN 978-80-248-1290-8
KALAB, K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části pohonu strojů*. 1. vydání VŠB-TU Ostrava, 2007, 91s. ISBN 978-80-248-1860-3
DEJL, Z.: *Konstrukce strojů a zařízení I. Spojovací části strojů. Návrh. Výpočet. Konstrukce*. Montanex a.s. Ostrava, 2000, ISBN 80-7225-018-3
MORAVEC, V., HAVLÍK, J.: *Výpočet a konstrukce strojních dílů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0878-1
NĚMČEK, M.: *Řešené příklady ČaMS Spoje*. 2. vydání. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8
LEINVEBER, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*. 1. vydání. Úvaly: Albra-pedagogické nakladatelství, 2003, ISBN 80-86490-74-2

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Kubín, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Roman Fousek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Příčná 307, Kopřivnice, 74221

Anotace diplomové práce

FOUSEK, R. *Zařízení na měření kroutícího momentu elektromotoru : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2012, 59 s. Vedoucí práce: KUBÍN, T.

Práce se zabývá konstrukčním návrhem měřicí stanice pro měření kroutících momentů elektromotorů Leroy s výkonem 450W. Jedná se o levnější alternativu oproti profesionálním měřicím spojkám. Specificky navržená konstrukce umožňuje testovat různé druhy spojek i brzd. Diplomová práce se také v krátkosti zabývá praktickým využitím polymerbetonů a problematikou tenzometrie, včetně reálné aplikace, která sloužila k naměření hodnot kroutícího momentu zapůjčeného elektromotoru. Vybrané naměřené úseky jsou zpracovány do tabulek a grafů a v závěru práce je celá metodika měření zhodnocena.

Annotation of master thesis

FOUSEK, R. *Torque Measuring Device For Electric motors : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2012, 59 p. Thesis head: KUBÍN, T.

This master thesis is dealing with design of torque measuring stand for electric motors (manufacturer Leroy) with its power of 450W. It is much cheaper alternative than professional torque measuring couplings. Specifically designed construction allows testing of different kinds of couplings and brakes. Master thesis is also dealing with practical using of epoxy granites and with strain gauge technology, including real application which served to torque measuring of loaned electric motor. Chosen measured sequences are processed into tables and diagrams and all measuring methodology is reviewed at the end of master thesis.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Popis měřeného zařízení	10
3	Možnosti měření krouťícího momentu.....	12
3.1	Nepřímé	12
3.2	Přímé.....	13
4	Vlastní návrh zařízení	15
4.1	Varianta 1	15
4.2	Varianta 2.....	17
4.3	Varianta 2a.....	17
4.4	Varianta 2b.....	19
5	Popis jednotlivých konstrukčních uzlů	22
5.1	Nosná konstrukce.....	22
5.2	Kyvná část.....	24
5.3	Úchyty snímačů	28
5.4	Měřicí plíšky	35
5.5	Uložení kyvné části.....	36
5.6	Brzda.....	37
5.7	Rychlospony	38
5.8	Spojka	41
6	Kalibrace a měření	42
6.1	Tenzometrie[9].....	42
6.2	Aplikace	46
6.3	Kalibrace.....	48
6.4	Měření.....	49
6.5	Naměřené hodnoty	49
7	Závěr	56
8	Seznam použitých zdrojů.....	57
9	Seznam příloh	58

Seznam použitých veličin

E_{mos}} .....	.modul pružnosti mosazi v tahu	[MPa]
F_R	reakční síla na špičkový krouticí moment	[N]
F_{o1}	osová síla ve šroubu	[N]
I	odebíraný proud	[A]
L_o .....	.rameno ohybu	[mm]
L_P	délka působíště reakční síly	[mm]
M_k	krouticí moment na hřídeli elektromotoru	[Nm]
M_o .....	.ohybový moment	[Nmm]
P	jmenovitý výkon elektromotoru	[W]
P_h	stoupání závitu šroubu	[mm]
P_P	příkon elektromotoru	[W]
R .....	.odpor tenzometru na počátku	[Ω]
R_1 .....	.odpor tenzometru	[Ω]
$R_{2,3,4}$ .....	...velikost odporu ve zbylých větvích	[Ω]
R_{e1}	mez pružnosti určená z pevnosti šroubu 8.8	[MPa]
R_{e1m} .....	.mez pružnosti určená z pevnosti matice 4.8	[MPa]
S_S	plocha hrotu stavěcího šroubu	[mm ²]
S_{s1}	plocha průřezu šroubu	[mm ²]
S_{z1}	celková plocha všech závitů	[mm ²]
U	napětí na motoru	[V]
U_m .....	.napětí na měřicí úhlopříčce	[V]
U_n .....	.napájecí napětí	[V]
d_2	střední průměr závitu	[mm]
d_3	malý průměr závitu	[mm]
d_m	průměr hrotu stavěcího šroubu	[mm]
f_{o-o}	součinitel tření ocel na ocel	[-]
h_1	funkční délka závitu	[mm]
i_P	počet ohýbaných plíšků	[-]
k .....	.konstanta tenzometru	[-]
k_{1z} .....	.součinitel zatížení prvního závitu	[-]
k_p	souč. zohledňující špičkový výkon elektromotoru	[-]
k_{s1}	vypočítaná bezpečnost šroubu	[-]
k_{sd1}	dovolená bezpečnost šroubu	[-]

k_{sm1}.....	.statická bezpečnost matice	[-]
l.....	.délka tenzometru na počátku	[mm]
n.....	.otáčky hřídele elektromotoru	[min ⁻¹]
p_1.....	.průměrný tlak na všechny závity	[MPa]
p_1'.....	.tlak na první závit	[MPa]
p_s.....	.tlak na hrot stavěcího šroubu	[MPa]
y.....	.posunutí v místě působíště síly F_R	[mm]
Δl.....	.změna délky tenzometru	[mm]
ΔR.....	.změna odporu tenzometr	[Ω]
α.....	.vrcholový úhel závitu	[°]
ε.....	.konstanta tenzometru	[-]
η.....	.účinnost elektromotoru	[-]
π.....	.Ludolfovo číslo	[-]
σ_{red}.....	.redukované napětí ve šroubu	[MPa]
σ_{t1}.....	.tahové napětí ve šroubu	[MPa]
τ_{k1}.....	.krutové napětí šroubu	[MPa]
φ'.....	.redukovaný třecí úhel závitu	[°]
ψ_1.....	.úhel stoupání závitu	[°]
ω.....	.úhlová rychlost hřídele elektromotoru	[rad.s ⁻¹]

1 Úvod

Dnes již existují velmi spolehlivé a přesné metody k určení kroutících momentů, jsou však příliš nákladné a zároveň ne vždy vhodné pro danou aplikaci. Stejně tomu bylo i v tomto případě, kdy bylo potřeba zjistit příčiny nefungujících vakuových pump. Po montáži se někdy stane, že kombinace pumpy a motoru vůbec nefunguje. Poté je motor demontován a vrácen zpět do výrobní linky. Pokud neprojde ani napodruhé, je vyřazen jako nekompatibilní. Chyba však není na straně výrobce, jelikož samotné motory jsou v pořádku. Proto je snahou zjistit jaký výrobní parametr ovlivňuje to, že si pumpa s daným motorem nerozumí.

Výrobce těchto vakuových pump je společnost Edwards, zabývající se především vakuovou technikou pro laboratorní a průmyslové použití. Vakuování je nezbytné v celé řadě specifických odvětví, jde především o odsátí atmosféry, která je v podstatě nositelem prachových částic.

Tyto prachové částice mikroskopických rozměrů významně ovlivňují některé technologické procesy jakými jsou například:

- výroba displejů mobilních telefonů a televizorů,
- výroba polovodičů a mikročipů,
- výroba datových nosičů,
- nanášení velmi tenkých polovodičových vrstev při výrobě solárních článků,
- povrchové úpravy,
- zpracování vysoce kvalitních ocelí,
- výroba plastů.

Vakuování je nezbytné například i ve zdravotnictví a to při různých laboratorních zkouškách např. krve, v inkubátorech a také při výrobě léků. Další uplatnění nachází u elektronových mikroskopů, kdy je vakuum nezbytné, jelikož elektrony vysílané mikroskopem by mohly narážet do částic atmosféry. To by mělo za následek chybné vyhodnocení pozorovaného objektu.

Samotné pumpy jsou vyráběny velmi přesnými technologiemi, neboť právě přesnost je určujícím faktorem, zda bude daná pumpa fungovat správně, protože místo klasických kontaktních těsnění se využívá volná mezera, která je však menší než molekuly, ze kterých se vzduch skládá.

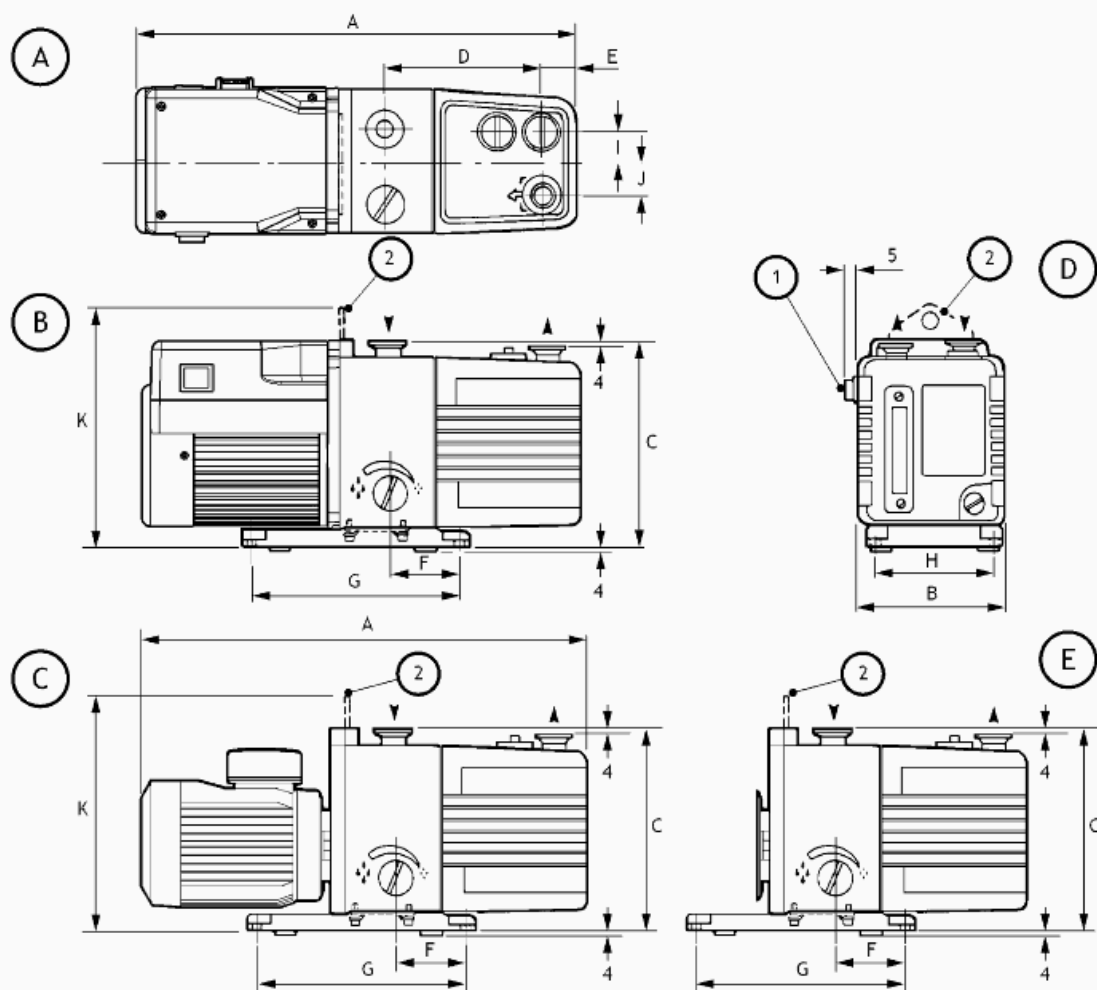
2 Popis měřeného zařízení

Měřeným zařízením je pohonná jednotka rotační lopatkové vakuové pumpy s označením RV12. Tato pumpa slouží pro odsávání vnitřní atmosféry a je navržena i pro odsávání hořlavých směsí, kdy je však potřeba dodržet jisté bezpečnostní předpisy. Na horní části je pumpa opatřena jednotlivými vstupy a výstupy pro přisávání/odsávání atmosféry, přívod/odvod mazacího oleje a přívod/odvod kondenzované vody z vnitřních prostor pumpy. Na zadní straně se nachází ukazatel množství oleje s min a max ryskou. Vakuovou pumpu pohání jednofázový (další variantou je třífázový) střídavý elektromotor o jmenovitém výkonu 450W a otáčkách 1470min^{-1} . Spojení motoru a pumpy je pomocí klasické pružné spojky s vnitřním pryžovým přenosovým členem. Tyto spojky bývají spolehlivé, dokáží eliminovat malé montážní nepřesnosti a díky středovému pružnému členu dokáží snižovat vibrace a případné rozběhové špičky.

Aby pumpa správně fungovala, musí být zahřátá na provozní teplotu. To je zapříčiněno konstrukcí pracovního prostoru, kde stator a rotor není oddělen žádným těsněním, ale jen mezerou, která je menší než molekula vzduchu. A jelikož se kovy zvyšující se teplotou roztahují, dojde k utěsnění mezery až po již zmíněném zahřátí. Samotným provozem se pumpa zahřeje natolik, že na povrchu je možné naměřit 60° až 70°C při teplotě okolí 20°C . To je způsobeno stlačováním odsávané atmosféry v pracovním prostoru pumpy.

Tab. 1 Vybrané technické parametry pumpy a motoru [1]

Výkon motoru [W]		Otáčky motoru [min-1]		Nominální napětí [V]		Hlučnost [dB]	Kapacita oleje pumpy [l]		Celková hmotnost [kg] (bez oleje)
50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz		min	max	
450	550	1470	1760	220-240	230-240	48	0,6	1,0	29



1. On-off switch (single-phase pumps only)
 2. Lifting bracket (Not fitted to RV3 and RV5 pumps: a lifting handle is fitted instead)

- A. Top view of single-phase pump
 B. Side view of single-phase pump
 C. Side view of three-phase pump
 D. Front view of single-phase pump
 E. Side view of bareshaft pump

Pump	A*	A†	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
RV3	430	429	158	225	127	29	78	230	120	37	32	-
RV5	430	429	158	225	127	29	78	230	120	37	32	-
RV8	470	429	158	225	161	35	78	230	120	37	32	261
RV12	439	429	158	225	181	35	78	230	120	37	32	261

* Single-phase pumps.

† Three-phase pumps.

Obr. 1 Rozměrové parametry motoru a pumpy [1]

3 Možnosti měření kroutícího momentu

V krátkosti se zmíním o možnostech, které se nabízejí v případě, že je potřeba přesně měřit kroutící moment. Dále zdůvodním své rozhodování při výběru optimální konstrukční varianty. Metody měření lze v podstatě rozdělit do následujících skupin.

3.1 Nepřímé

Do této kategorie spadá měření pomocí elektrických veličin a následný přepočet podle známých vzorců. Přesnými měřidly jsme schopni určit elektrické napětí na motoru a také odebíraný proud a podle vztahu (1) získat příkon elektromotoru.

$$P_p = U \cdot I \quad [W] \quad (1)$$

P_p ...příkon elektromotoru [W]

Unapětí na motoru [V]

I odebíraný proud [A]

A následně spočítat kroutící moment vykonaný motorem.

$$M_k = \frac{P_p}{\omega} \cdot \eta = \frac{60 \cdot P_p}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \eta \quad [Nm] \quad (2)$$

M_k ...kroutící moment na hřídeli elektromotoru [Nm]

ωúhlová rychlost hřídele elektromotoru [rad.s⁻¹]

ηúčinnost elektromotoru [-]

πLudolfovo číslo [-]

n otáčky hřídele elektromotoru [min⁻¹]

Z tohoto vzorce plyne, že je potřeba znát otáčky hřídele a účinnost motoru s dostatečnou přesností a stejnou frekvencí záznamu, jako je tomu u napětí a proudu. Měření otáček není v tomto případě žádným problémem, zatímco určení účinnosti motoru je problematické. Ani typická hodnota od výrobce nestačí z důvodu odchylek, ať už od výroby nebo od provozu samotného (zahřívání, chvění...)

Tuto metodu však mohu v budoucnu s výhodou použít právě pro určení účinnosti elektromotoru.

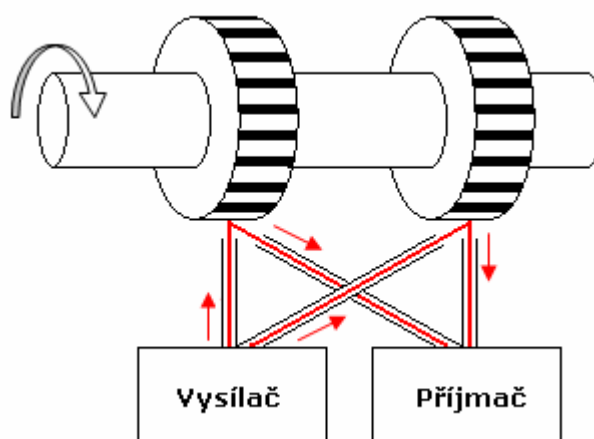
3.2 Přímé

Jsou to metody, kterými měříme přímo výstupní krouticí moment, vykonávaný hřídelí elektromotoru. Nejdostupnější variantou je měření pomocí speciálních spojky, které fungují na tenzometrických principech (více o tenzometrii v kapitole 6.1), kdy dochází k mechanické deformaci tenzometrů a výpočtu napětí pomocí elektrických veličin. Nevýhodou těchto spojek je jejich vysoká cena, nezřídka přesahující padesát tisíc korun.



Obr. 2 Příklad spojky pro měření kroutícího momentu [2]

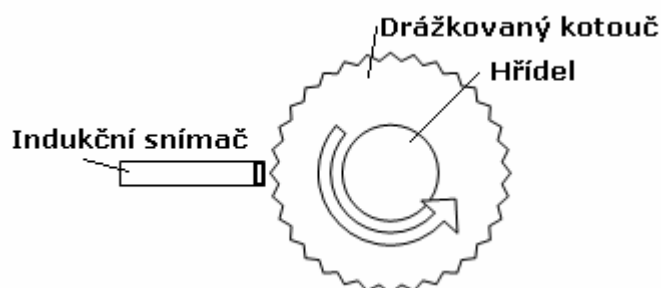
Další přímou metodou je měření pomocí laserových snímačů. Principem této metody je umístění dvou kotoučků (obr. 3), které mají po svém obvodu střídající se černé a bílé pruhy, na hřídel. Na oba tyto kotouče dopadá prostřednictvím trubice z optických vláken laserový paprsek, jehož odraz je opět přes další trubice veden do přijímače. Pokud hřídel není zatížena, oba odrazy laseru jsou ve fázi. Při zatížení se oba kotouče vůči sobě pootočí a vyhodnocovací zařízení podle fázového posunu určí k jaké deformaci došlo.



Obr. 3 Princip měření momentu laserem

Teoreticky by bylo možné využít podobného principu jako v předchozím případě tak, že by se optická část nahradila elektronickou a pomocí indukčních snímačů se snímaly drážky na obvodu obou kotoučů. Indukční snímač funguje tak, že při přiblížení kovového

materiálu do kontaktní vzdálenosti se začne generovat indukce, na kterou snímač zareaguje sepnutím. Při nezatížení hřídele by byly opět oba signály ve fázi. Při zatížení by se signály posunuly, a podle tohoto posunutí by bylo možno určit deformaci a moment. Oproti laserové metodě je toto řešení podstatně levnější, neboť cena jednoho indukčního snímače se pohybuje v řádu stovek korun, je však otázkou, zda by přesnost byla dostatečná.



Obr. 4 Princip měření momentu indukčními snímači

Poslední, a mnou zvolenou variantou, je navržení vlastního zařízení, které by k měření používalo tenzometrické snímače. O této variantě se rozepíšu konkrétně v následujících kapitolách.

4 Vlastní návrh zařízení

Po důkladném rozboru jsem se rozhodl pro vytvoření seznamu požadavků kladených na měřicí zařízení. Požadavky jsem podle důležitosti rozdělil do dvou skupin. V první skupině jsou požadavky, které musí být bezpodmínečně splněny, a ve druhé jsou požadavky spíše výhodné než nezbytné.

Zařízení musí:

- mít stabilní a tuhou nosnou konstrukci, při manipulaci se nesmí trvale deformovat,
- mít dostatek prostoru pro použití více druhů spojek,
- měřit se vzorkovací frekvencí minimálně 180 měření na jednu otáčku (4410Hz),
- být uzpůsobeno pro měření s pumpou zapojenou jako brzdou,
- mít dostatek prostoru pro použití zvlášť konstruované brzdy,
- mít hmotnost bez pumpy a motoru menší než 40kg,
- být vyrobeno z korozi-vzdorných materiálů nebo být opatřeno antikorozi-vní vrstvou.

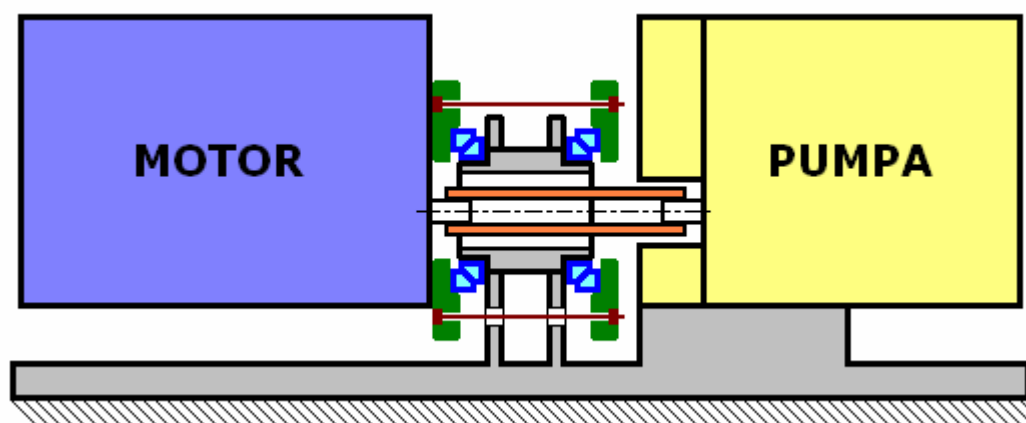
Zařízení by mohlo

- mít rychloupínací systém motorů k urychlení a zjednodušení jejich výměny (výměna by neměla trvat více než minutu),
- mít náklady spojené s výrobou nižší než 15 000 Kč.

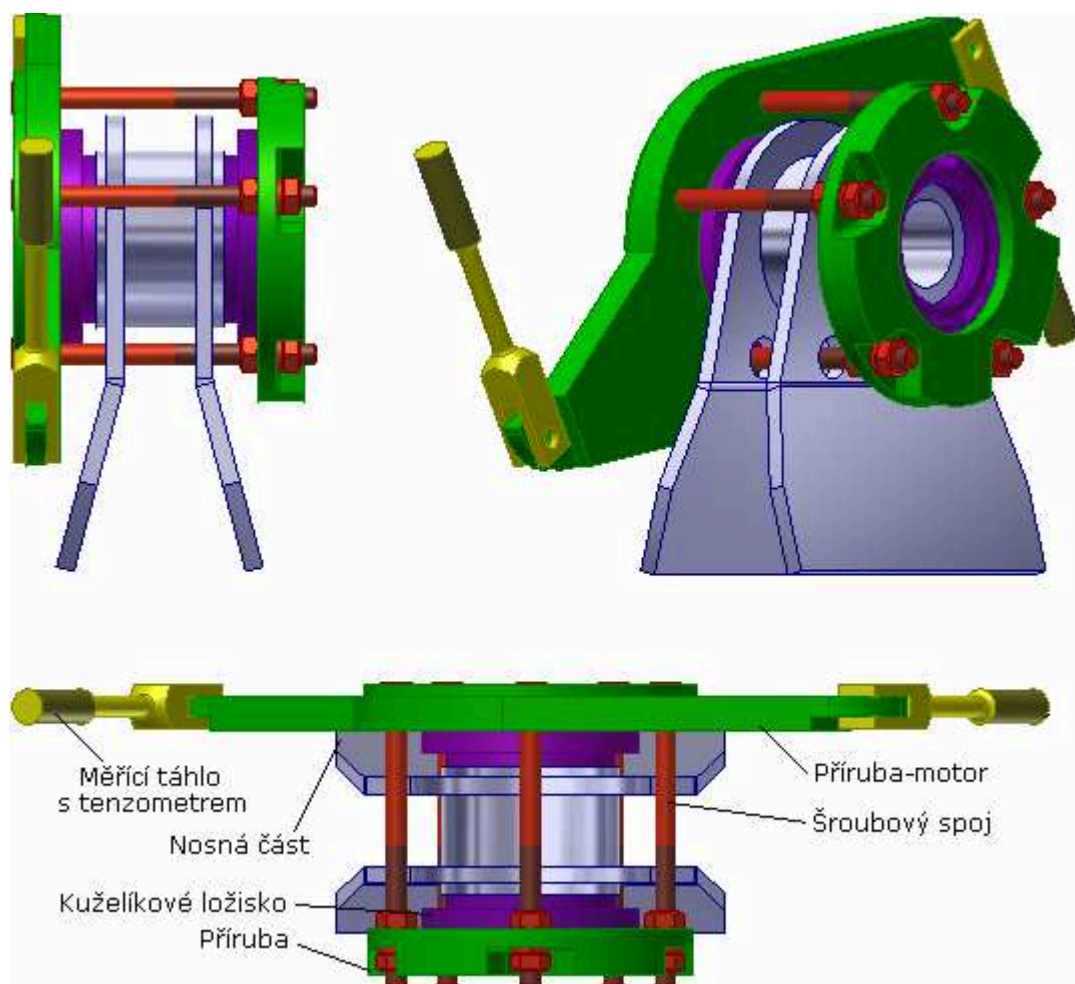
Už od počátku bylo uvažováno o pevně uložené brzdě a pohyblivě uloženém motoru, který bude mít tendenci vlivem reakčního momentu „otáčet“ sám sebou. Postupně jsem navrhl několik následujících variant.

4.1 Varianta 1

Mezi prvními variantami byl návrh konstrukce skládající se ze tří hlavních částí, a to nosné části, kuželíkových ložisek a přírub. Kuželíková ložiska se nacházela na obou stranách nosné části a byla k sobě pevně přitlačena přírubami se šrouby. Tímto vzniklo předpětí umožňující motor upevnit tak, aby nedošlo k jeho úhlovému vyosení. Tuto variantu jsem dále nerozvíjel především kvůli nutnému velkému předpětí v ložiscích (tzn. velkému odporu proti otáčení) a také malým tahovým silám v měřicích tyčinkách. Byla by snížena citlivost tenzometrických snímačů.



Obr. 5 Schéma upevnění motoru a brzdy – varianta 1



Obr. 6 3D vizualizace a popis částí – varianta 1

Shrnutí vlastností varianty 1

Výhody

- jednoduchá konstrukce
- snadno dosažitelná přesnost (výroba i montáž)
- nízká cena
- respektuje pracovní pozici motoru i pumpy

Nevýhody

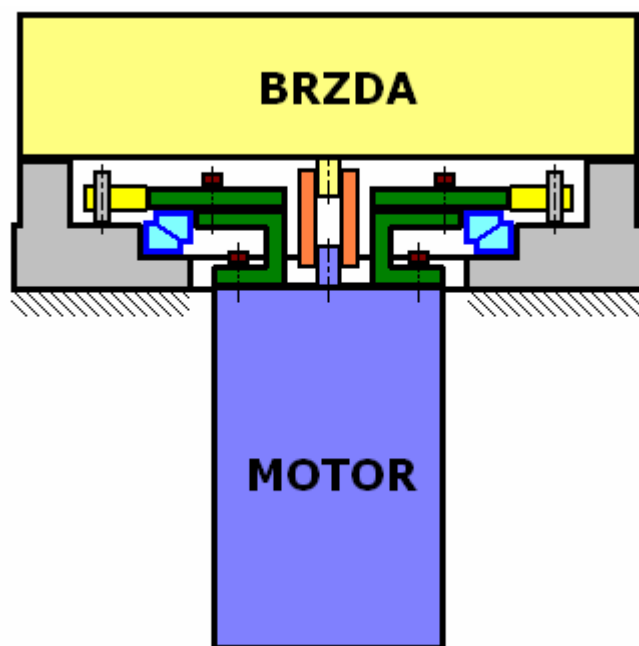
- nutné vysoké předpětí
- malá deformace měřících tyčinek
- málo místa pro umístění různých typů spojek

4.2 Varianta 2

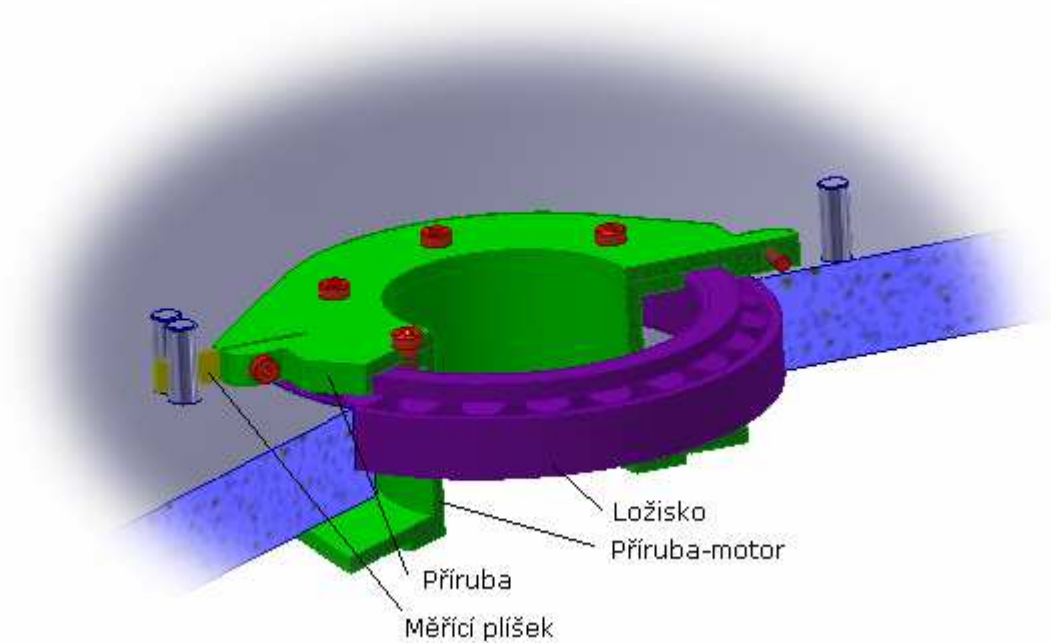
Dále jsem se zaměřil na varianty, u kterých bude měřen reakční moment pomocí ohýbajících se plíšků s nalepenými tenzometry. Tímto řešením byla získána variabilita v použití různých průřezů plíšků a tím i jejich deformací.

4.3 Varianta 2a

Principem je příruba motoru, volně položená na velkém ložisku (kuželíkovém nebo axiálním kuličkovém), s osou ve vertikálním směru. Tato varianta je pochopitelně nevhodná, protože nesplňuje jednu z hlavních podmínek a tou je zapojení pumpy jako brzdy. Pokud bychom ovšem použili vhodný typ brzdy, má toto řešení velmi dobré vlastnosti. Ložisko je zatíženo pouze hmotností motoru. Použitím většího ložiska se však odporový moment zvyšuje delším ramenem, na kterém působí síla od hmotnosti motoru a příruby.



Obr. 7 Schéma upevnění motoru a brzdy – varianta 2a



Obr. 8 3D vizualizace a popis částí – varianta 2a

Shrnutí vlastností varianty 2b

Výhody

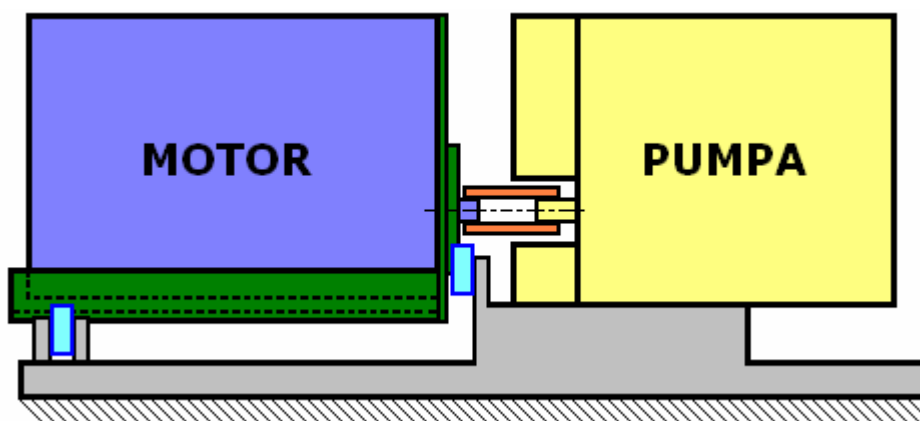
- jednoduchá konstrukce
- snadno dosažitelná přesnost (výroba i montáž)
- dobrá citlivost tenzometrických snímačů
- malé zatížení nosné konstrukce

Nevýhody

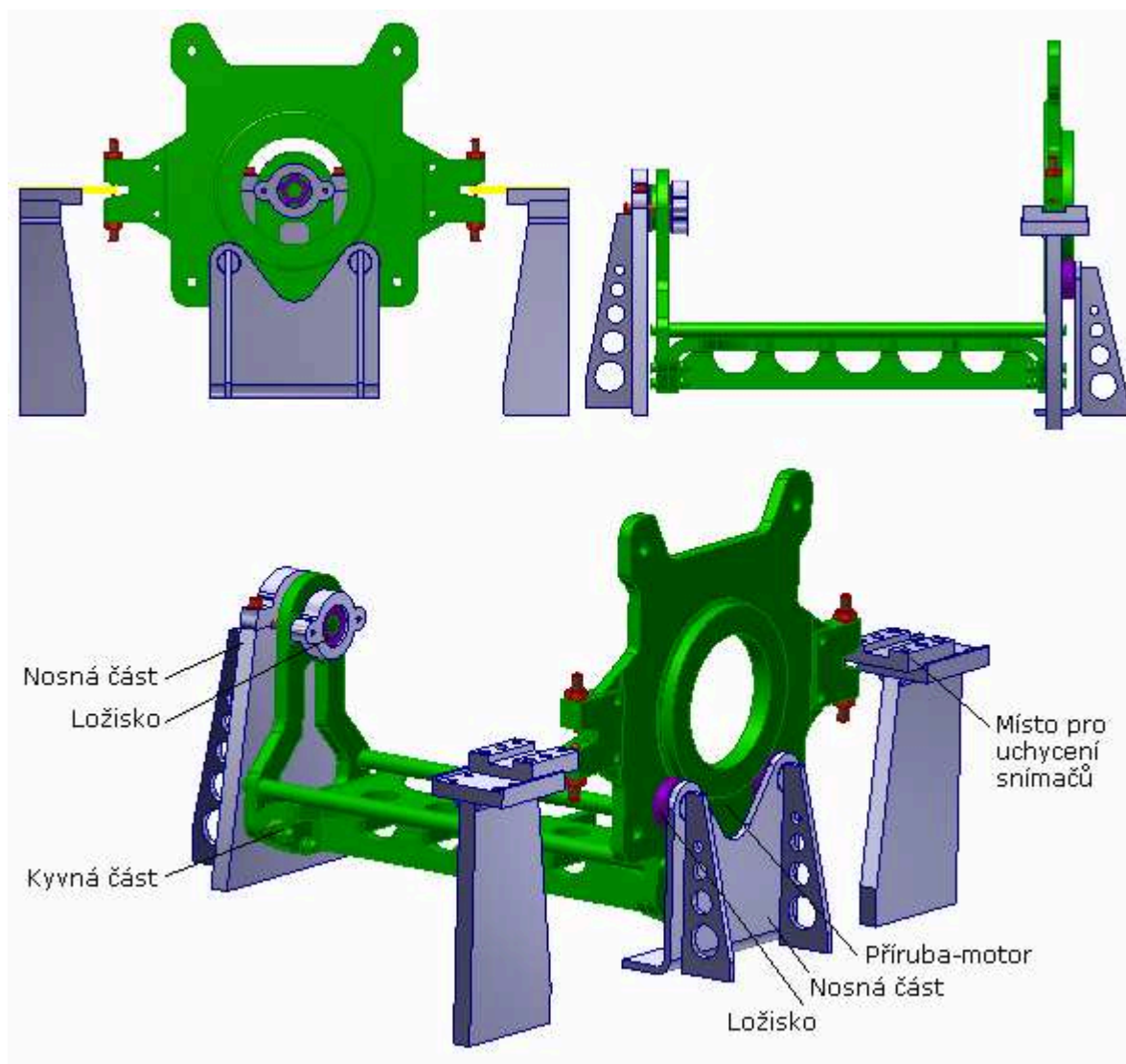
- nerespektuje pracovní pozici motoru
- problematická výměna motorů
- neumožňuje použití pumpy jako brzdy

4.4 Varianta 2b

Poslední varianta spočívá v přenesení osy motoru do horizontálního směru a zároveň zatížením ložisek pouze hmotností motoru s kyvnou částí. Po stranách příruby se nacházejí úchyty pro měřicí plíšky, které přenášejí krouticí moment do pevné konstrukce. Celá kyvná část s upevněným motorem je podložena čtyřmi ložisky. Tuto variantu jsem se rozhodl dále rozvíjet. Přibližný princip je na obr. 9. Rozpracované verzi se věnuji v následující kapitole.



Obr. 9 Schéma zapojení motoru a brzdy – varianta 2b



Obr. 10 3D vizualizace a popis částí – varianta 2b

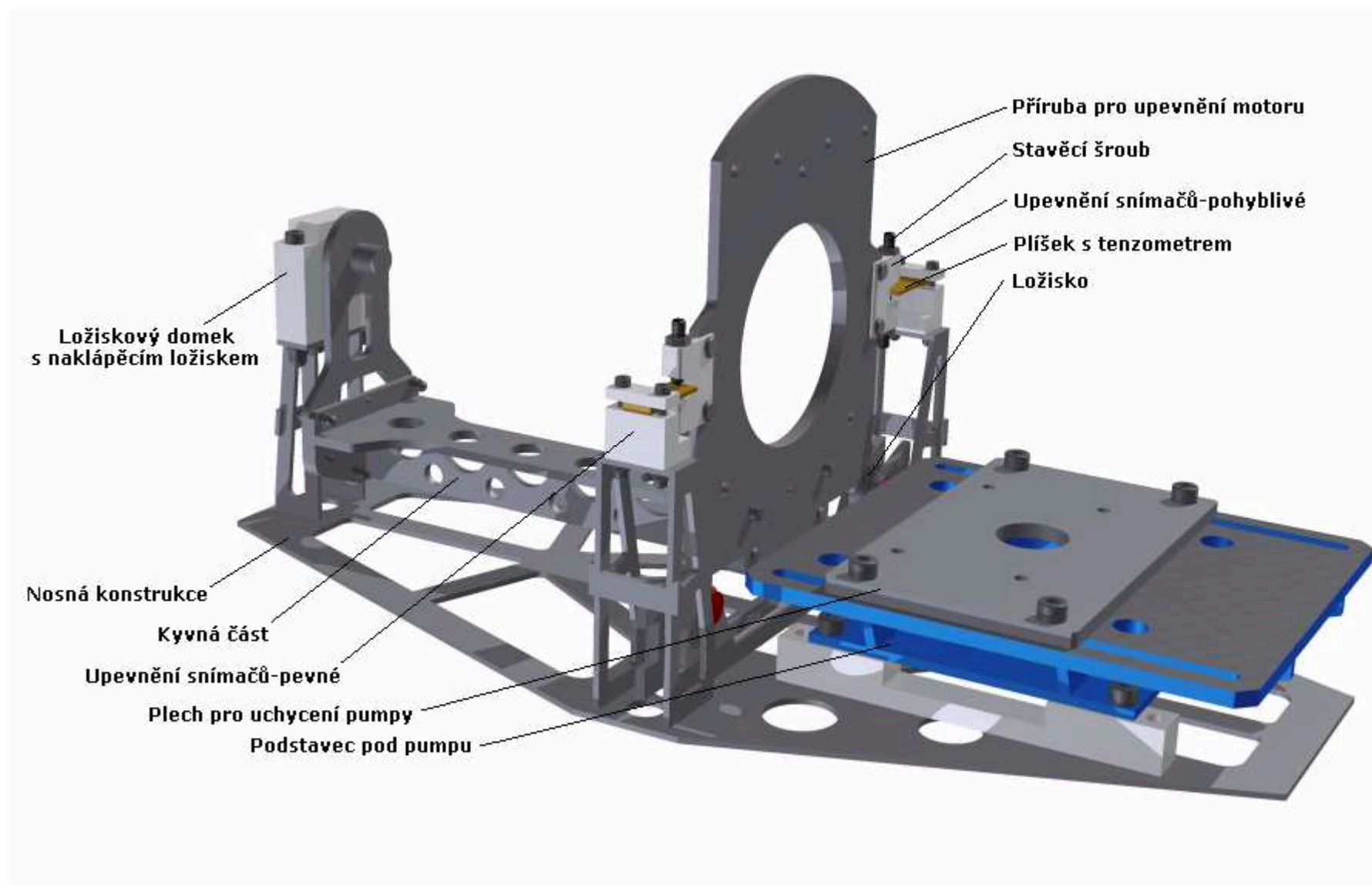
Shrnutí vlastností varianty 2b

Výhody

- respektuje pracovní polohu motoru i pumpy
- nízký odporový moment
- dobrá citlivost tenzometrických snímačů
- možnost použití více typů spojek
- možnost použití pumpy jako brzdy

Nevýhody

- složitější konstrukce
- větší náchylnost k nepřesnosti při montáži



Obr. 11 Celkový pohled na konstrukci s popisem jednotlivých konstrukčních celků

5 Popis jednotlivých konstrukčních uzlů

5.1 Nosná konstrukce

Vzhledem k dostupnosti technologie pálení plechů, její relativně nízké ceny a vysoké přesnosti jsem se rozhodl nosnou část vytvořit právě z vypálených plechů. Nabízely se dvě následující varianty.

Tlustostěnná konstrukce

Svařená, případně i sešroubovaná z plechových dílů tloušťky větší než 5mm (8mm, 10mm). Důvodem je tlumení vibrací. Myslím si, že vlastnosti tohoto provedení by nebyly nikterak příznivé. Vlivem působení tepla by mohlo docházet k větším dilatacím, které by zvětšovaly chyby měření. Dalším omezením byla technologie výroby, jelikož při svařování by došlo k nežádoucím deformacím. Nabízela se varianta sešroubování ohýbaných profilů. Tento způsob jsem také zavrhl, a to z důvodu nedostupnosti technologie pro ohýbání tlustších plechů.

Tenkostěnná konstrukce

Druhou variantou je svaření celé konstrukce z tenkých plechů (tloušťka plechu 3mm) a následné zalití polymerbetonem. Pro minimalizování deformací způsobených svařováním jsou svary pouze bodové a v co nejmenším počtu. Celistvost, tuhost a pevnost zajišťuje již zmíněný polymerbeton. Ve spodní části jsou zalité dlouhé matice M10x30 pro uchycení k pevnému stolu nebo pro připojení stavěcích nožek. Hmotnost celé nosné části je podle přibližného výpočtu v programu Inventor 25,5kg.

Na základě výše uvedených úvah jsem jako nejvhodnější variantu zvolil tenkostěnnou konstrukci zalitou v polymerbetonu.

Polymerbeton (jiným názvem epoxygranit) je směs dvousložkové epoxidové pryskyřice s vhodným plnivem (např. písek, kovové kuličky, špony, skleněné kuličky, šterk apod.), která tvrdne na základě chemické reakce pryskyřice a tvrdidla. Při vytvrzování samotné pryskyřice a tvrdidla dochází k silnému vývinu tepla, proto se nedoporučuje takto vytvářet rozměrnější výrobky (cca do několika set gramů v závislosti na použitém typu). Tomuto lze zabránit právě přidáním plniva, které většinu tepla na sebe

naváže a zrovnoměrní tak teplotu celého odlitku, která pak překračuje teplotu okolí maximálně o několik desítek stupňů. Vhodné plnivo plní další důležitou roli, a to tlumení vibrací. K tomu je však potřeba, aby plnicí směs měla různou velikost zrnitosti jednotlivých složek. Problémem však je jak poznat, která směs je ještě vhodná, a která už méně. Neexistují žádné přesné „recepty“ pro vytvoření ideálního polymerbetonu. Na Internetu jsou však k dispozici návody nadšenců, kteří se tímto odvětvím zabývají. Obecně lze říci, že největší zrnitost složky by měla být poloviční až třetinová, než je nejmenší rozměr otvoru zalévané části. Je to z důvodu, aby se uvnitř nevytvářely „nedolítky“.

Uvádím jednu z mnoha směsí plniva polymerbetonu, kterou autor použil pro sendvičovou konstrukci rastrové desky určenou pro upínání na své CNC frézce [3].

- 50% dorsilit 2G (křemičitý písek, zrnitost 5-8mm)
- 25% dorsilit 8 (křemičitý písek, zrnitost 0,3-0,8mm)
- 15% balotina 0.075-0.125 mm (skleněné kuličky, zrnitost 0,075-0,125mm)
- 10% dorsilit 10000 (křemičitá moučka, zrnitost cca 0,005-0,063mm)

Pro zajímavost také uvádím vlastnosti polymerbetonu v porovnání s běžným betonem (který se také nabízel jako možný materiál odlitku), ocelí a litinou (tab. 2). Tyto hodnoty je však potřeba brát s rezervou, protože výsledné vlastnosti závisí na mnoha faktorech, jako je použitá pryskyřice, použitá směs plniva, teplota a délka vytvrzení, použité tvrdidlo a další. Hlavními důvody proč jsem si zvolil polymerbeton byla jeho výborná tlumicí schopnost (udává se až 7x rychlejší tlumení než u litiny), jednoduché zpracování, celistvý nedrolící se povrch odlitku a relativně nízká cena. Použil jsem výrobcem doporučený poměr pryskyřic a tvrdidla 10:1.

Tab. 2 Porovnání vlastností vybraných materiálů [4]

	Jednotky	POLYMERBETON	BETON	ŠEDÁ LITINA	OCEL
Hustota	kg/dm ³	2,3	2,5	7,15	7,85
E-modul	kN/mm ³	30 - 40	35 - 45	80 - 140	210
Pevnost v tahu	N/mm ²	10 - 15	0,8 - 5	150 - 400	400 - 1600
Pevnost v tlaku	N/mm ²	110 - 125	10 - 35	600 - 1000	250 - 1200
Pevnost v tahu při ohybu	N/mm ²	25 - 35	0,8 - 5	250 - 490	-
Tlumení (log. dekrement)	-	0,02 - 0,03	-	0,003	0,002
Tepelná vodivost	W/mK	1,3 - 2	1,28 - 1,54	50	50
Měrná tepelná kapacita	kJ/kgK	1	-	0,5	0,5
Koef. teplotní roztažnosti	K ⁻¹	14 - 16	-	11	12

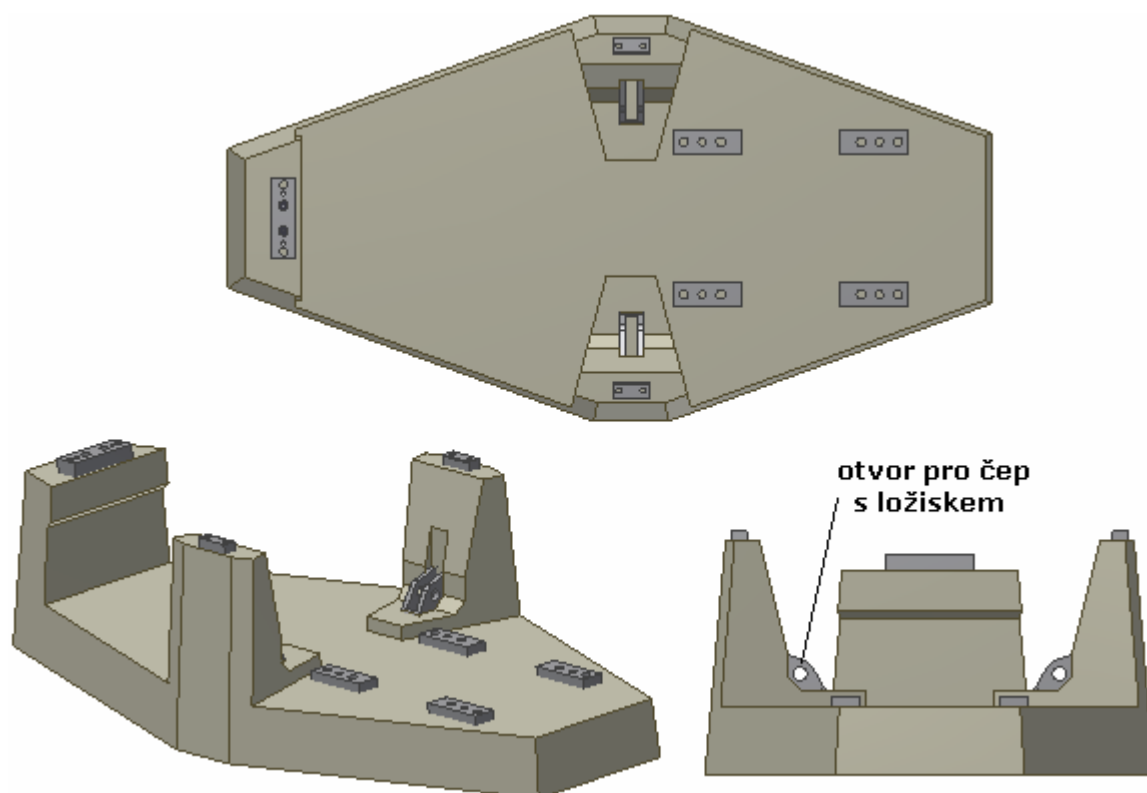
Vlastnosti pryskyřice CHS-EPOXY 455 [5]

(v kombinaci s tvrdidlem P11)

- přídržnost 2,5MPa
- pevnost v tlaku 200MPa
- pevnost v ohybu 120MPa
- tažnost 5%
- doba zpracovatelnosti při 20°C 20min
- doba úplného vytvrzení 7dnů

Použité plnivo

Použil jsem již hotovou směs pro výrobu polymerbetonů výrobce BETOSAN typ BETOFIL FH-DSH[6] se zrnitostí 0,01 až 4mm. Poměr pryskyřice a plniva jsem zvolil 1:8.



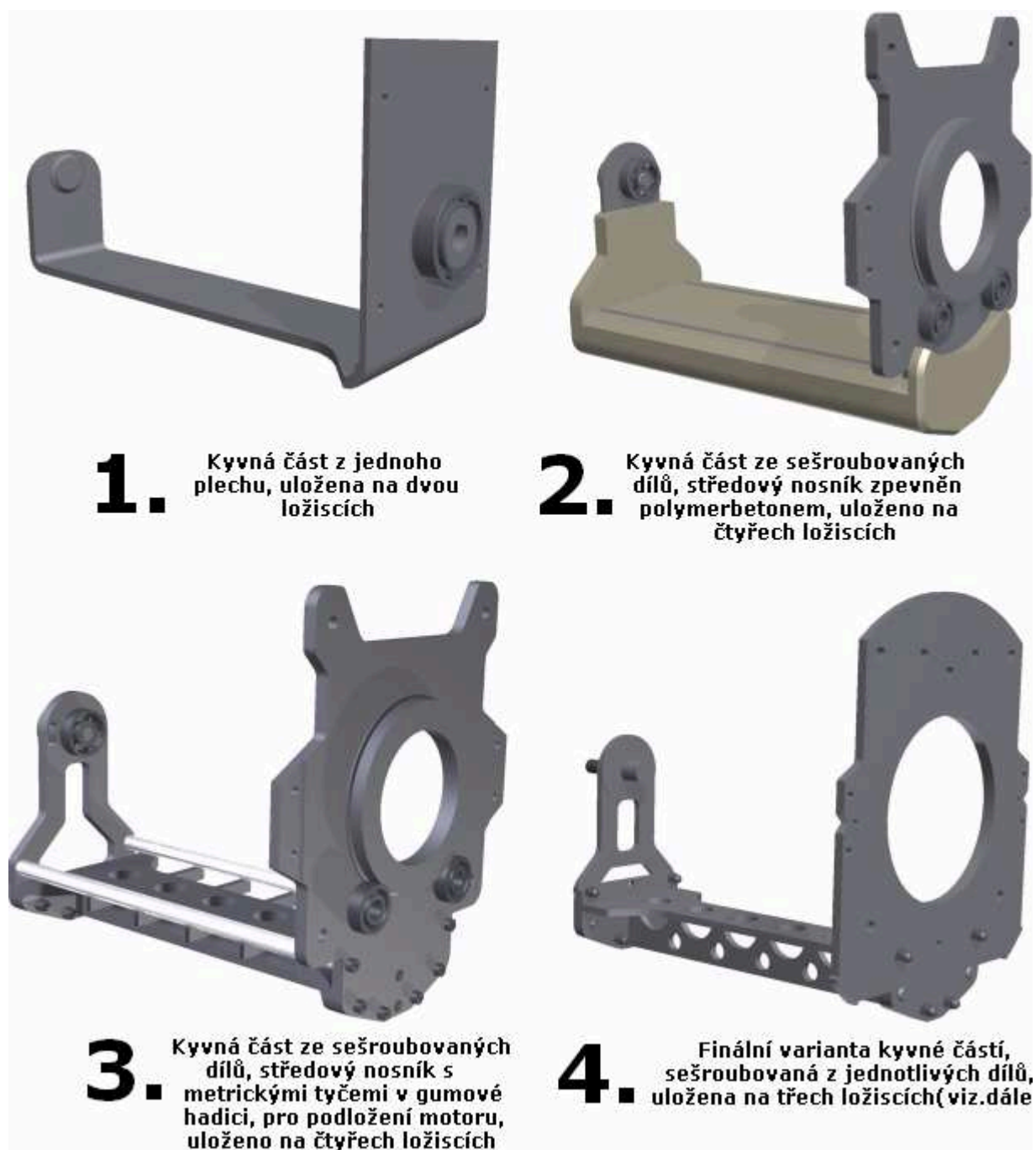
Obr. 12 Nosný rám v polymerbetonovém odlitku

5.2 Kyvná část

Kyvná část je v podstatě jediný pohyblivý díl v celé konstrukci. Umožňuje motoru kyvný pohyb kolem osy otáčení hřídele. Pohyb však bude omezen měřicími plíšky, čímž

bude docházet k výkyvu maximálně v řádu několika stupňů (v závislosti na použitém průřezu).

V počátcích návrhu měla být kyvná část vyrobena z ohýbaného plechu, tuto variantu jsem zavrhl z důvodu malé tuhosti a špatně dosažitelné přesnosti výroby. V dalším konstruování jsem však vycházel z prvotního tvaru, který jsem dále zdokonaloval. Postup vývoje kyvné části je patrný z obrázku níže.

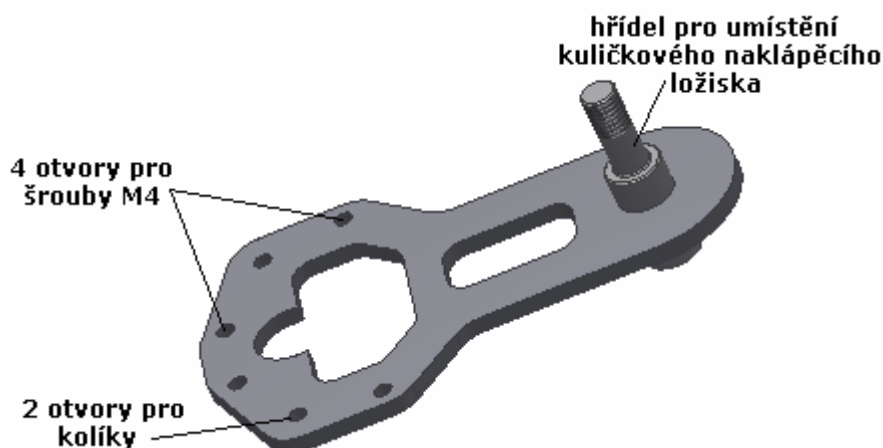


Obr. 13 Vývoj kyvné části

Při návrhu jsem vycházel z předpokladu, že při použití plechů do tloušťky 3mm by docházelo ke špatnému tlumení vibrací, a proto jsem zvolil ocelové plechy tloušťky 5mm a více. Je však možné v rámci snížení hmotnosti nahradit ocel durallem. Postupným vývojem jsem dospěl ke konečné verzi, která se skládá ze tří částí:

- zadní patka,
- střední nosník,
- přední příruba.

Zadní patka je připojena k nosníku čtyřmi šrouby M4, a proti axiálnímu pohybu způsobenému vibracemi je zajištěna dvěma nalisovanými kolíky. Je přesně vypálena z 5mm silného plechu a po přivaření ložiskového čepu je její připojovací plocha obrobena tak, aby bylo dosaženo požadované kolmosti vůči ose čepu. Na ose čepu je dosedací plocha kuželíkového ložiska, které je zajištěno samojistnou maticí s PU kroužkem M10.



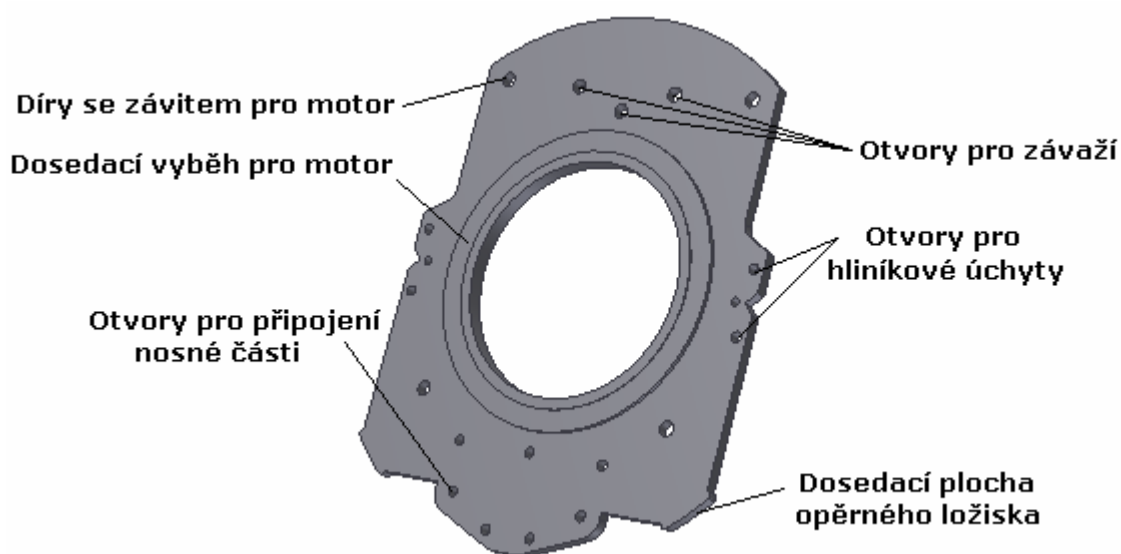
Obr. 14 Patka kyvné části

Nosník (obr. 15) je namáhaný ohybem s přidavkem velmi malého krutu způsobeného překonáváním odporu zadního ložiska. Krut však vzhledem k jeho velikosti zanedbávám. Pro zajištění dobré tuhosti je ve spodní části nosníku navařena (po celé jeho délce) vzpěra s odlehčujícími otvory. Přesná rovnoběžnost dosedacích ploch je získána obrobením na jediné upnutí. Vyroben je z 5mm silných výpalků pomocí svařování.



Obr. 15 Nosník kyvné části

Příruba pro upevnění motoru je vypálena z plechu tloušťky 8mm a z jedné strany je vytvořeno osazení, které přesně zapadá do vybrání na motoru. Toto vybrání zajišťuje stejnou polohu pro všechny měřené motory. Po stranách jsou vyvrtány čtyři otvory pro upevnění hliníkových úchytů senzorů, v horní části tři otvory pro připojení vyvažovacích závaží a ve spodní části se nachází stejné otvory pro uchycení k nosníku jako u patky. Motor je přišroubován k přírubě čtyřmi imbusovými šrouby M6. Tato varianta upnutí je však příliš zdoluhavá a pro člověka obsluhujícího tyto měřicí zařízení fyzicky náročná. Proto bude nutnost nahradit šrouby rychloupínacím systémem.



Obr. 16 Příruba kyvné části

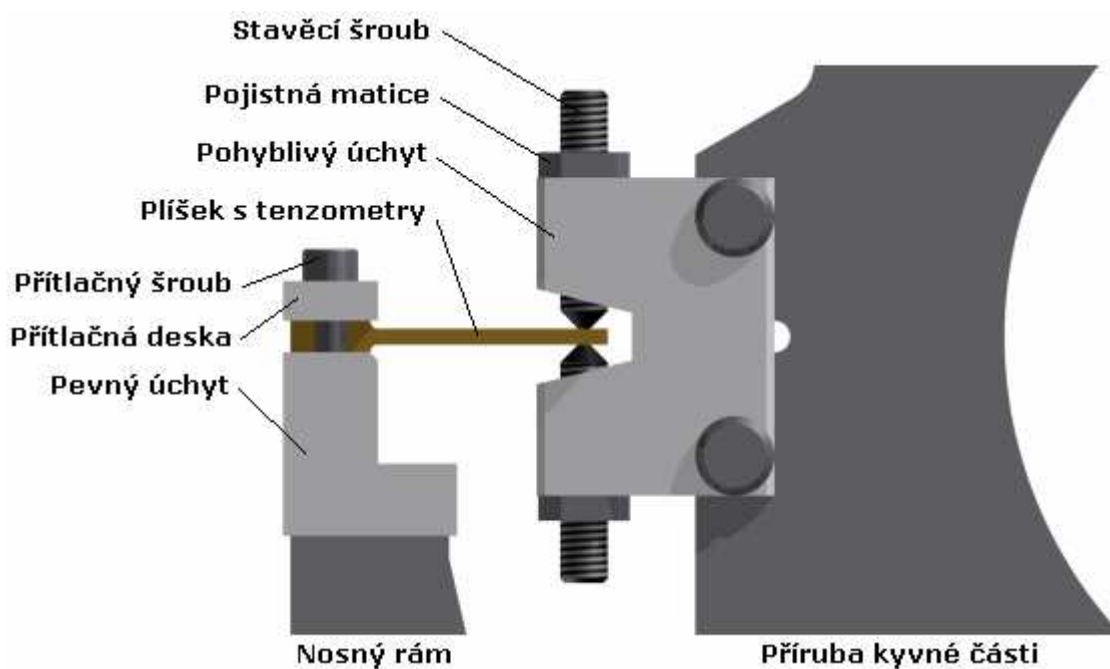
5.3 Úchyty snímačů

Pohyblivé

Jsou vyrobeny z hliníku a jsou pevně spojeny s přírubou kyvné části. Úchyt obsahuje vybrání pro vložení jednoho konce plíšku tak, aby měl ve směru deformace dostatek prostoru. Přesné seřízení osy plíšků s osou hřídele motoru umožňují dva stavěcí šrouby M6x30 pojištěné z druhé strany maticí. Tyto šrouby zároveň slouží k přenášení kroutícího momentu od motoru.

Pevné

Jsou přišroubovány k nosné konstrukci a částečně zality polymerbetonem. Snímače jsou zde pevně přitlačovány dvěma imbusovými šrouby M4 přes přitlačnou hliníkovou destičku. Rozhodl jsem se provést kontrolu pevnosti těchto přitlačných šroubů.



Obr. 17 Detail upevnění snímačů a popis

Pevnostní kontrola kyvné části

Pro tuto kontrolu jsem se rozhodl využít MKP analýzu integrovanou v Autodesk Inventor 2011. Provedl jsme následující definici okrajových podmínek a zatížení:

- definice pevné vazby pro vnitřní kroužky dvou předních ložisek,
- definice pevné vazby pro vnější kroužek zadního ložiska,

- zavedení vlivu zatížení vlastní hmotností (definování gravitačního zrychlení),
- zavedení tlaků, způsobených kroutícím momentem přenášeným z motoru přes snímače do konstrukce (rozhodl jsem se použít tlak místo síly, vzhledem k tomu, že MKP analýzy v působících sil vytvářejí extrémní napětí, která jsou ve skutečnosti nižší) – tento tlak je vypočten níže a jeho působíštěm jsou hroty stavěcích šroubů,
- zavedení kroutícího momentu od motoru.

Výpočet kroutícího momentu elektromotoru

- vycházím ze jmenovitého výkonu a otáček elektromotoru

$$P = \frac{M_k \cdot \omega}{k_p}$$

$$M_k = \frac{k_p \cdot P}{\omega} = \frac{k_p \cdot 60 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (3)$$

$$M_k = \frac{5 \cdot 60 \cdot 450}{2 \cdot \pi \cdot 1470} = 14,6 \text{ Nm}$$

P....jmenovitý výkon elektromotoru [W]

M_k...jmenovitý kroutící moment elektromotoru [Nm]

k_p...součinitel zohledňující špičkový výkon elektromotoru [-]

(předpokládám k_p=5)

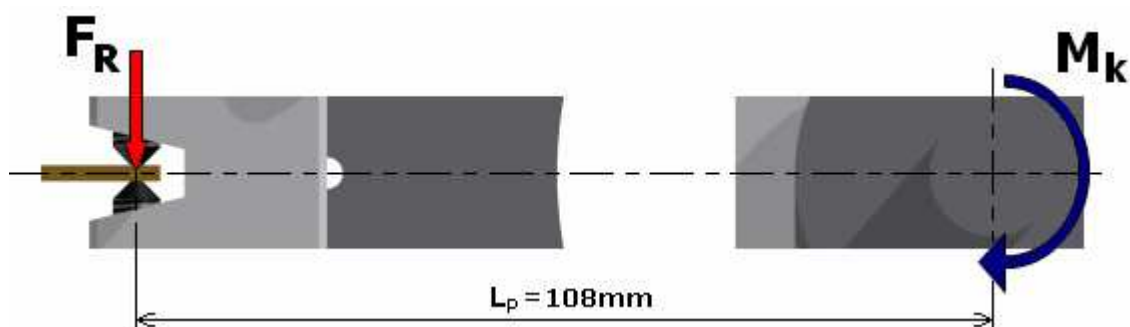
ω....úhlová rychlost hřídele elektromotoru [rad.s⁻¹]

n....jmenovité otáčky elektromotoru [min⁻¹]

Výpočet reakční síly působící na hroty stavěcích šroubů

-je to síla, která je reakcí na kroutící moment, působí na vzdálenosti L_p a tlakem zatěžuje místa v nichž se dotýkají stavěcí šrouby a plíšky

-tato síla také způsobuje ohyb plíšků s tenzometry



Obr. 18 Znáznornění působíště reakční síly

$$F_R = \frac{M_k}{i_p \cdot L_p} \quad (4)$$

$$F_R = \frac{14,6}{2 \cdot 0,108} = 67,7\text{N}$$

F_R ...reakční síla na špičkový kroutící moment [N]
 i_p ...počet ohýbaných plíšků [-]
 L_p ...délka působíště reakční síly [mm]

Výpočet tlaku na plochu hrotu stavěcího šroubu

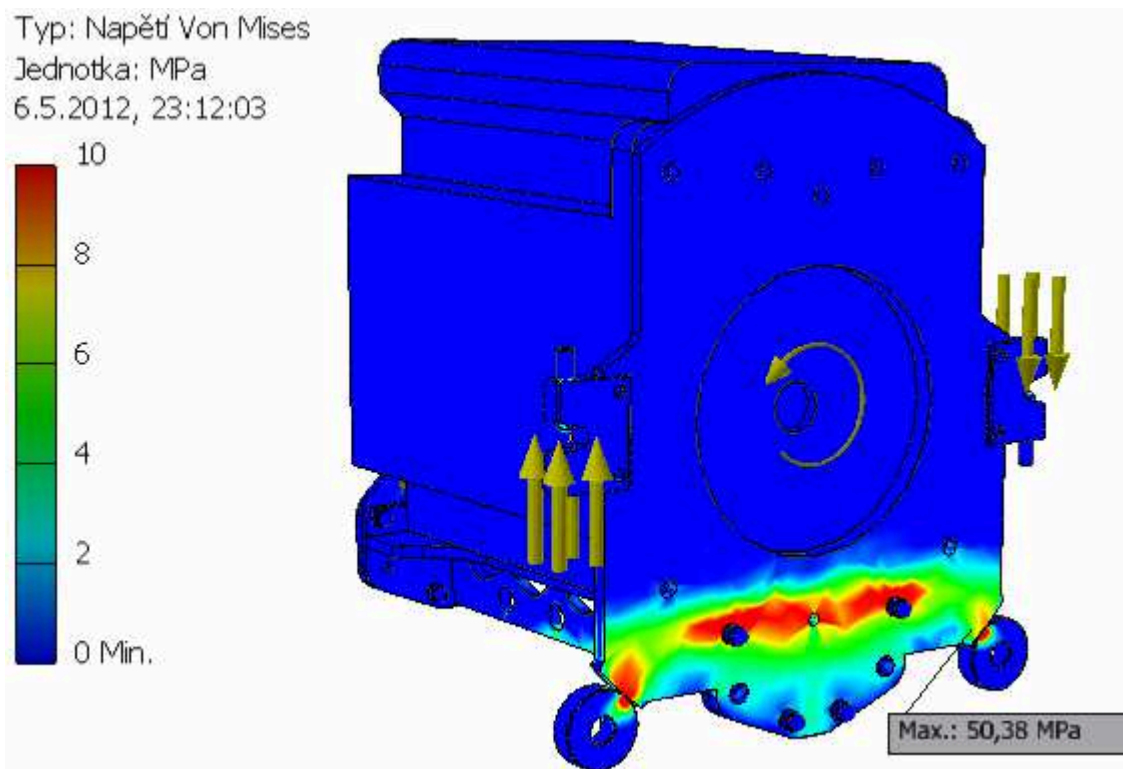
$$p_s = \frac{F_R}{S_s} = \frac{4 \cdot F_R}{\pi \cdot d_m^2} \quad (5)$$

$$p_s = \frac{4 \cdot 67,7}{\pi \cdot 1,5^2} = 38,3\text{MPa}$$

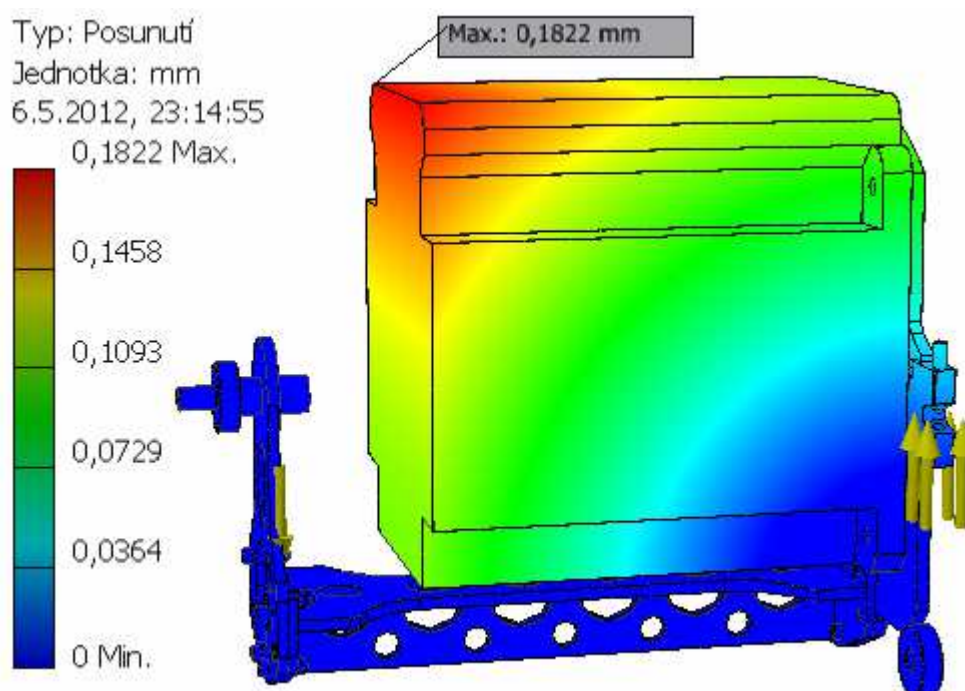
p_s ...tlak na hrot stavěcího šroubu [MPa]
 S_s ...plocha hrotu stavěcího šroubu [mm²]
 d_m ...průměr hrotu stavěcího šroubu [mm]
 (pro šroub M4 je $d_m=1,5\text{mm}$)

Výsledky MKP analýzy

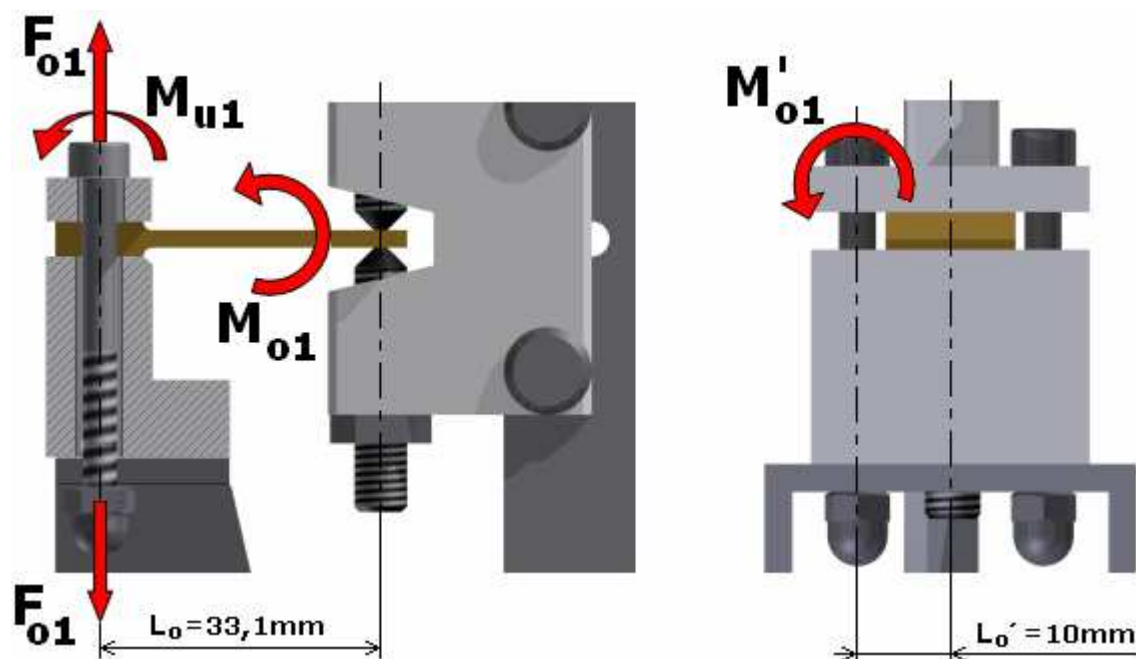
Vzhledem k malým výsledným napětím jsem změnil rozsah stupnice z maximálního napětí 50,38MPa na 10MPa. Na obr. 19 je tak lépe zobrazené rozložení napětí. Sytě červenou je označeno veškeré napětí nad 10MPa a nepřekračuje již zmíněnou maximální hodnotu.



Obr. 19 Výsledek analýzy kyvné části – napětí



Obr. 20 Výsledek analýzy kyvné části – posunutí



Obr. 21 Zatížení šroubů

Přitlačné šrouby jsou namáhány tahem od vyvozeného předpětí, krutem od utahování a také ohybem, jež je způsoben reakční silou F_R a silou od předpětí F_o . Velikost těchto ohybových napětí je závislá na deformační čáře šroubu. Vzhledem k malým silám ve šroubu a dostatečné tuhosti přitlačné desky tyto momenty zanedbám a zohledním je pouze velikostí minimální statické bezpečnosti, kterou volím $k_{sd1}=5$. Zvolil jsem imbusové šrouby M4 o pevnosti 8.8, které se šroubují do matic přivařených k nosné konstrukci (předpokládám minimální pevnost matic 4.8). Volím také požadovanou osovou sílu ve šroubu $F_{o1}=500\text{N}$, která je podle mého názoru více než dostatečná k tomu, aby nedošlo k uvolnění plíšků.

Další známé hodnoty:

$$d_2=3,545\text{mm}$$

$$d_3=3,141\text{mm}$$

$$D_1=3,242\text{mm}$$

$$k_{1z}=0,4$$

$$p_h=0,7$$

$$F_{o1}=300\text{N}$$

$$\alpha=60^\circ$$

$$f_{o-o}=0,1[8]$$

Úhel stoupání

$$\psi_1 = \arctg \frac{P_h}{\pi \cdot d_2}$$
$$\psi_1 = \arctg \frac{0,7}{\pi \cdot 3,545}$$
(6)

ψ_1 ... úhel stoupání závitu [°]

P_h ... stoupání závitu šroubu [mm]

d_2 ... střední průměr závitu [mm]

Třecí úhel v závitu

$$\varphi'_1 = \arctg \frac{f_{o-o}}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$
$$\varphi'_1 = \arctg \frac{0,1}{\cos \frac{60}{2}} = 4,94^\circ$$
(7)

φ' ... redukovaný třecí úhel závitu [°]

f_{o-o} ... součinitel tření ocel na ocel [-]

α ... vrcholový úhel závitu [°]

Tahové napětí ve šroubu

$$\sigma_{t1} = \frac{F_{o1}}{S_{s1}} = \frac{4 \cdot F_{o1}}{\pi \cdot d_3^2}$$
$$\sigma_{t1} = \frac{4 \cdot 500}{\pi \cdot 3,141^2} = 64,5 \text{ MPa}$$
(8)

σ_{t1} ... tahové napětí ve šroubu [MPa]

F_{o1} ... osová síla ve šroubu [N]

S_{s1} ... plocha průřezu šroubu [mm²]

d_3 ... malý průměr závitu [mm]

Namáhání šroubu na krut

$$\tau_{k1} = \frac{8 \cdot F_{o1} \cdot \tg(\psi_1 + \varphi'_1) \cdot d_2}{\pi \cdot d_3^3}$$
$$\tau_{k1} = \frac{8 \cdot 500 \cdot \tg(3,596 + 4,94_1) \cdot 3,545}{\pi \cdot 3,141^3} = 21,9 \text{ MPa}$$
(9)

τ_{k1} ... krutové napětí šroubu [MPa]

Redukované napětí ve šroubu a bezpečnost

$$\sigma_{red1} = \sqrt{\sigma_{t1}^2 + 3 \cdot \tau_k^2}$$

$$\sigma_{red1} = \sqrt{64,5^2 + 3 \cdot 21,9^2} = 74,8 \text{ MPa} \quad (10)$$

σ_{red} ..redukované napětí ve šroubu [MPa]

$$k_{s1} = \frac{R_{e1}}{\sigma_{red1}}$$

$$k_{s1} = \frac{640}{74,8} = 8,56 < k_{sd1} = 5 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (11)$$

k_{s1} ...vypočítaná bezpečnost šroubu [-]

k_{sd1} ..dovolená bezpečnost šroubu [-]

R_{e1} ..mez pružnosti určená z pevnosti šroubu 8.8 [MPa]

Kontrola celého závitu a prvního závitu matice

$$p_1 = \frac{F_{o1}}{S_{z1}} = \frac{F_{o1}}{\pi \cdot d_2 \cdot \frac{h_1}{p_{h1}} \cdot \frac{d - D_1}{2}}$$

$$p_1 = \frac{500}{\pi \cdot 3,545 \cdot \frac{5}{0,7} \cdot \frac{4 - 3,242}{2}} = 16,6 \text{ MPa} \quad (12)$$

p_1 ...průměrný tlak na všechny závity [MPa]

S_{z1} ...celková plocha všech závitů [mm²]

h_1 ...funkční délka závitu [mm]

$$p_1' = \frac{k_{1z} \cdot F_{o1}}{S_{z1}} = \frac{k_{1z} \cdot F_{o1}}{\pi \cdot d_2 \cdot \frac{d - D_1}{2}}$$

$$p_1' = \frac{0,4 \cdot 500}{\pi \cdot 3,545 \cdot \frac{4 - 3,242}{2}} = 47,4 \text{ MPa} \quad (13)$$

p_1' tlak na první závit [MPa]

k_{1z}součinitel zatížení prvního závitu [-]

(předpokládám, že první závit přenáší 40% celkového zatížení)

$$k_{sm1} = \frac{R_{e1m}}{p_1'} \quad (14)$$

$$k_{sm1} = \frac{320}{47,4} = 6,75$$

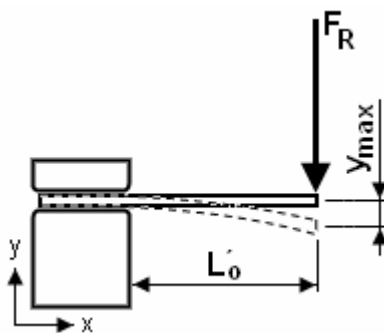
k_{sm1} ...statická bezpečnost matice [-]

R_{e1m} ...mez pružnosti určená z pevnosti matice 4.8 [MPa]

Z výsledků je patrné, že šroub i matice vyhovují předpokládanému zatížení.

5.4 Měřicí plíšky

Jsou to dva tenké pásky přenášející moment od motoru do nosné konstrukce. Při tomto přenosu se ohýbají a pomocí tenzometrů lze zjistit, jak velká je deformace a tím i napětí. Nabízelo se mnoho materiálů a průřezů, z jakých plíšky vyrobit. Nakonec jsem se rozhodl pro použití mosazné ploché tyče 12x2mm.



Obr. 22 Schéma pro výpočet posunutí v ose y

$$y = \frac{M_o}{E_{mos} \cdot W_o} = \frac{F_R \cdot L_o'}{E_{mos} \cdot \frac{b \cdot h^3}{6}} \leq y_{max} \quad (15)$$

$$y = \frac{67700 \cdot 26}{95000 \cdot \frac{12 \cdot 2^3}{6}} = 1,16\text{mm}$$

yposunutí v místě působení síly F_R [mm]

M_oohybový moment [Nmm]

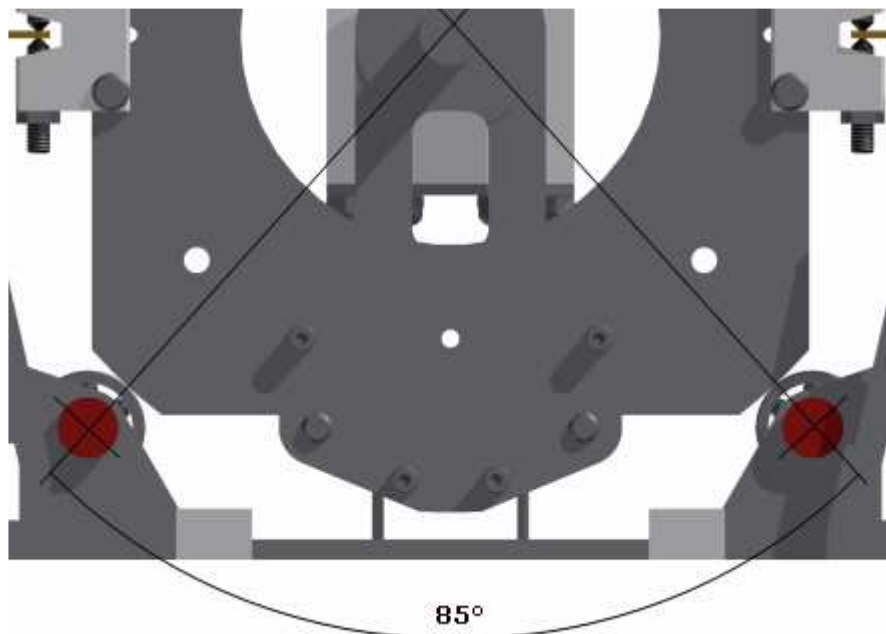
k_{1z}součinitel zatížení prvního závitu [-]

L_o' rameno ohybu [mm]

E_{mos} ...modul pružnosti mosazi v tahu [MPa]

5.5 Uložení kyvné části

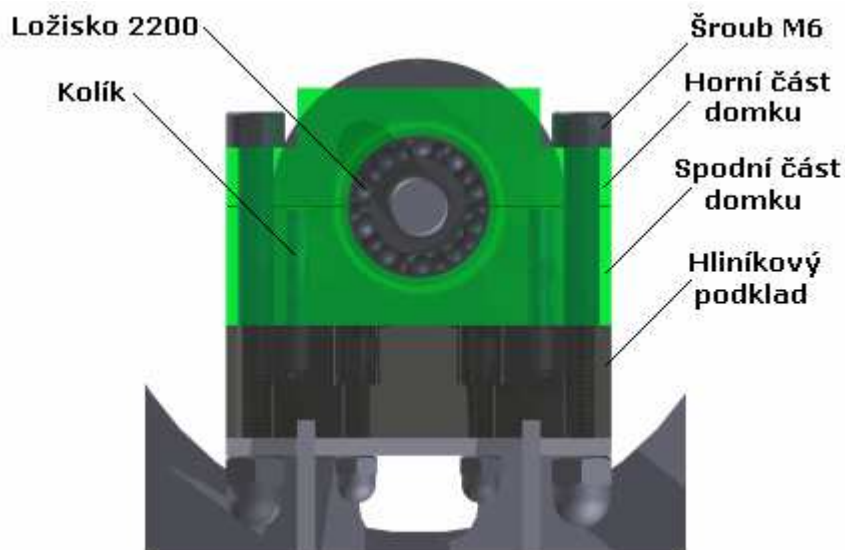
Přírubová část je volně položena na dvou jednořadých kuličkových ložiscích velikosti 6200, které jí poskytují dostatečnou stabilitu spolu s nízkým valivým odporem. Vnitřní průměr ložiska je 10mm. To je umístěno na čepu pevně uloženém v nosné konstrukci a zajištěn maticí. Ložiska svírají se středem osy příruby úhel 85° .



Obr. 23 Uložení předních ložisek

Zadní patka kyvné části je uložena v jediném naklápěcím kuličkovém ložisku velikosti 2200. Toto ložisko přenáší minimální zatížení, slouží však především k zajištění polohy celé kyvné části. Zároveň také dobře eliminuje případné výrobní nepřesnosti.

Ložisko je uloženo v hliníkovém domku složeného ze dvou částí. Celý domek je následně dvěma dlouhými šrouby přišroubován k maticím nacházejících se uvnitř nosné konstrukce. Zajištění polohy domku a hliníkového podkladu je realizováno dvěma čepy.



Obr. 24 Uložení zadního ložiska s popisem

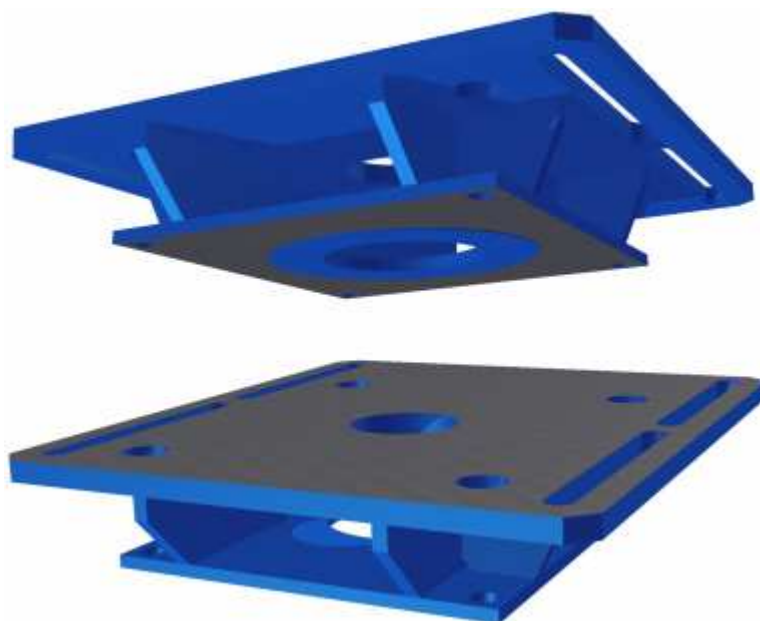
Výpočet trvanlivosti ložisek jsem neprováděl z důvodu, že budou pouze kmitat v rozsahu nanejvýš několika stupňů. To však může mít na ložiska fatální následky, jelikož hrozí, že vlivem vibrací vzniknou důlky od kuliček na oběžných drahách. To by znamenalo zhoršení odporových momentů, které ovlivní měření. Proto doporučuji provést důkladné sledování ložisek a v případě, že bude docházet k jejich rychlému poškození, je nahradit ložisky s čárovým stykem (soudečkové a válečkové). Na druhou stranu není zatížení ložisek nikterak vysoké a mohly by být dlouhodobě provozuschopné.

5.6 Brzda

Z počátku hodlám použít jako brzdu již zmíněnou pumpu. A to z důvodu, že je potřeba získat průběhy momentů z fungující kombinace motoru a pumpy, kterou bude následně možno porovnávat s charakteristikami špatně fungujících motorů. Také je potřeba znát průběh zatížení během celého pracovního cyklu pumpy kvůli budoucímu simulování tohoto průběhu zvláštní brzdou.

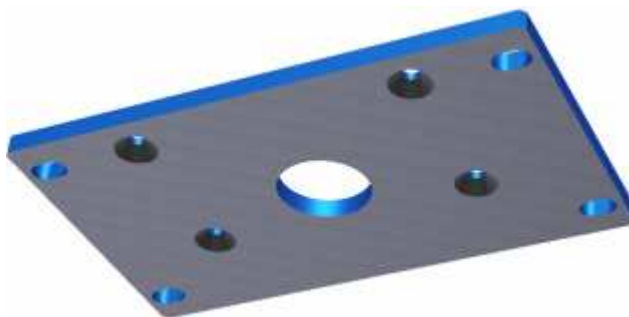
Jelikož bude brzda teprve navrhována, ponechal jsem dostatek prostoru pro její budoucí zástavbu do nosné konstrukce. Kvůli volnému prostoru bylo nutné zkonstruovat podstavec pod stávající pumpu tak, aby bylo možné její osu ustavit co nejpřesněji do osy hřídele motoru.

Dále bylo potřeba dosáhnout vysoké tuhosti, proto jsem podstavec navrhl jako svařenec z vypálených plechů 5 a 8mm. Po svařování jsou funkční plochy obrobeny na jedno upnutí, aby došlo k co nejmenší odchylce od vzájemné rovnoběžnosti obou ploch. Nejvhodnější technologií je v tomto případě soustružení.



Obr. 25 Svařovaný podstavec pod pumpu

Samotný podstavec však k upnutí pumpy nestačí, jelikož ta má připojovací otvory umístěny na své spodní straně a šroubování by tak bylo téměř nemožné. Proto je na pumpu přišroubován plát 8mm silného plechu. Ten obsahuje čtyři zahhloubené otvory pro zápusťné šrouby s kuželovou hlavou M6x16 a dále čtyři oválné otvory pro připojení k podstavci. Otvory jsou oválné z důvodu možnosti posuvu pumpy do stran způsobené například nepřesnou výrobou celé nosné části. Tento plech se záměrně obrábí až jako poslední součást celé sestavy a to na přesný rozměr, který je potřeba pro dokonalé seřízení os hřídelí pumpy a motoru ve svislém směru.



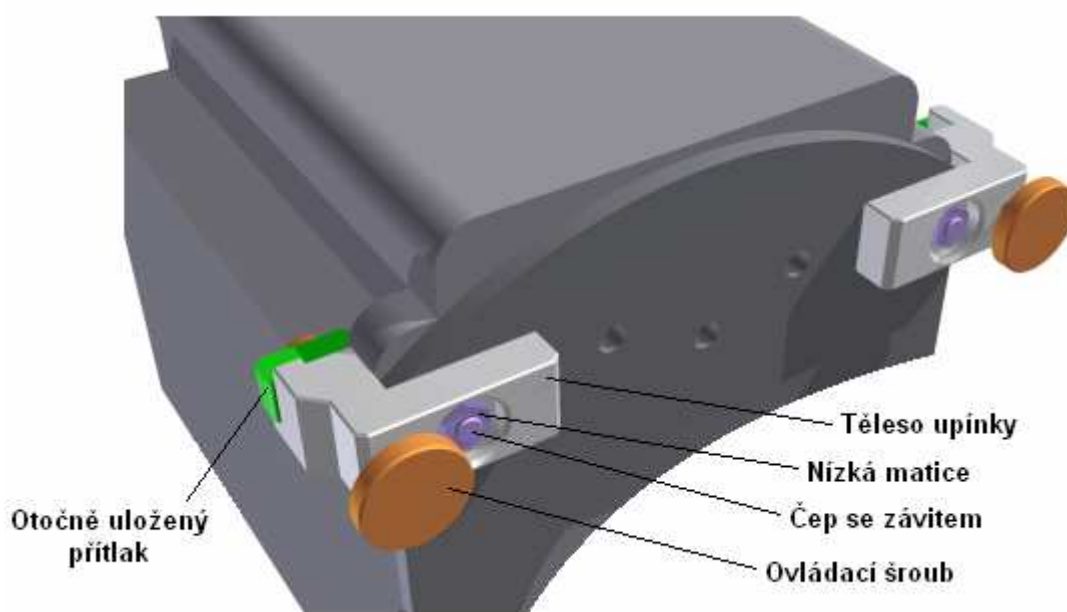
Obr. 26 Plechová podložka pod pumpu

5.7 Rychlospony

V budoucnu bude potřeba testované motory mezi sebou rychle vyměňovat. Navrhl jsem jednoduché rychlospony, které umožňují podle původního požadavku vyměnit motor do jedné minuty. Rozhodoval jsem se mezi variantou, kdy motor je přitlačován pružinou, a variantou, ve které je motor přitlačován šroubem. Pružina by byla ovládána přes pákový mechanismus a umožňovala by obsluze uchytit motor pouhým přestavením páky. Pružiny

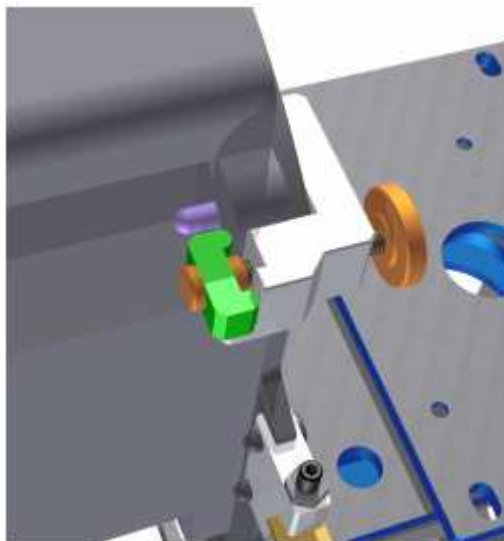
by mohly vnést do konstrukce drobné přídavné vibrace, a proto jsem se rozhodl pro již zmíněné uchycení pomocí šroubů.

Vycházel jsem z předpokladu, že bude dostatečné motor upevnit jen v jeho horní části. Také je potřeba myslet na obsluhu, která musí co nejméně nést váhu motoru. Z tohoto důvodu jsem umístil do obou horních otvorů na přírubě dva čepy, na které se motor nasune. Tyto čepy mají na straně procházející přírubou závit M6, ke kterému se poté přišroubuje těleso rychlospony.



Obr. 27 Čelní pohled na rychlospony s popisem

Na jednom konci ovládacího šroubu je přivařena rýhovaná matice a na druhém je otočně uložený přítlačný hranolek. Při šroubování ve směru hodinových ručiček dojde k povolení sevření a vlivem tření se přítlak pootočí o 90° , kde se zastaví o doraz. Při dalším povolování se přítlačný hranolek už jen posouvá. Při utahování (pohyb proti směru hodinových ručiček) dojde opět vlivem tření k pootočení přítlaku o 90° , opětovnému zastavení o doraz a následnému přitlačení motoru k přírubě. Celý utahovací moment je vyvozen bez pomoci nástrojů. Provedl jsem měření, při kterém jsem zjistil, že člověk je schopen vyvinout rukou při utahování moment od 3 do 4 Nm. Pomocí těchto hodnot jsem vypočítal sílu, kterou bude motor přitlačován k přírubě (tab.3). Výpočet jsem provedl v rámci předmětu Konstrukční cvičení IV a uvádím pouze výsledné hodnoty. Použitý závit přítlačného šroubu je M6 v základní rozteči.

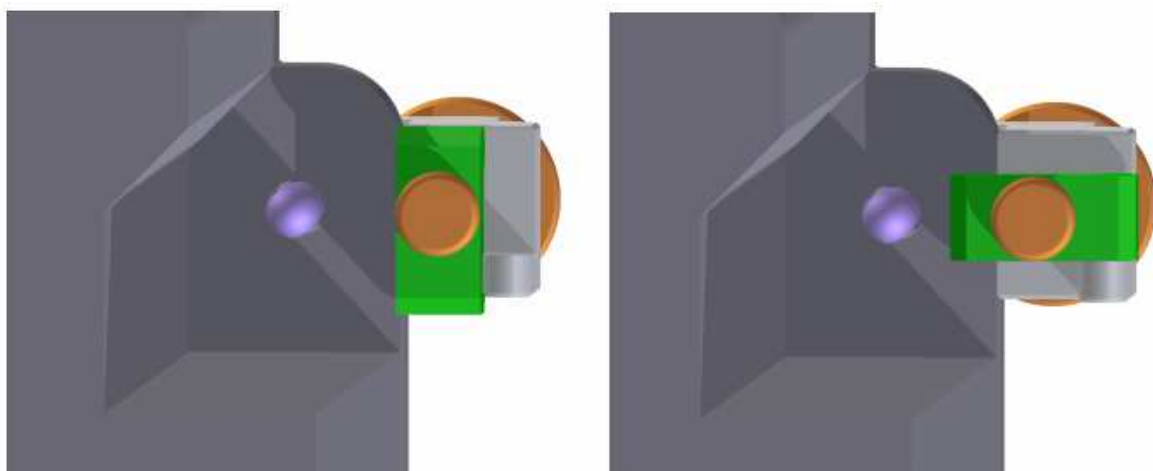


Obr. 28 Boční pohled na sponu

Tab. 3 Hodnoty přitlačné síly

	Utahovací moment	
	3 Nm	4 Nm
Přítlačná síla	1756 N	2342 N

Použity budou celkově dva šrouby, motor bude tedy přitlačován ve své horní části minimální silou 3500N.



Obr. 29 Detail povolené (vlevo) a utažené (vpravo) spony

5.8 Spojka

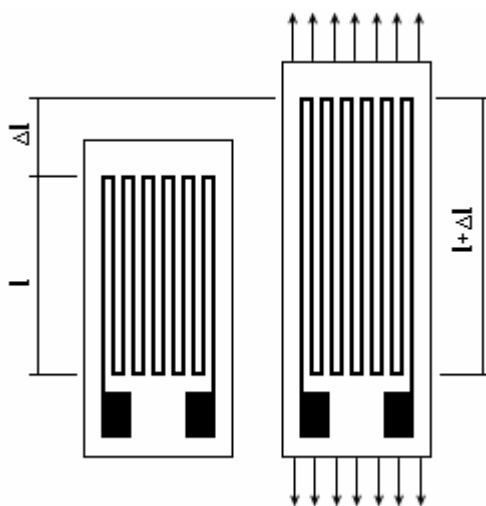
Poslední velmi důležitou částí zařízení je spojka, přenášející kroutící moment z motoru na brzdu. Tento člen do značné míry rozhoduje o chování celého systému, neboť špatně zvolená spojka způsobí nárůst vibrací a hlučnosti. Nakonec byla zvolena vlnovcová spojka, umožňující vyrovnat radiální, axiální a úhlová vyosení. Zároveň nabízí i vynikající torzní tuhost. K vidění je na obr. 35.

6 Kalibrace a měření

6.1 Tenzometrie[9]

Tenzometrické snímače fungují na principu změny odporu se změnou jejich délky (deformací). Jsou přilepeny k povrchu testované součásti a deformují se spolu s ní. Rozlišujeme dva typy tenzometrů, kovové a polovodičové. Nejdostupnější jsou kovové fóliové (starší provedení je drátkové) tenzometry, které mají svou mřížku vyleptanou na tenké plastové folii. Způsob výroby je v podstatě stejný jako při výrobě plošných spojů. Polovodičové tenzometry využívají své piezorezistence, což je vazba mezi relativní změnou měrného odporu a napjatostí. Ačkoliv mají citlivost až 60-ti násobnou oproti kovovým tenzometrům, rozhodl jsem se kvůli dostupnosti použít právě kovové fóliové tenzometry s vlastním odporem 120Ω .

Hodnota odporu slouží především k určení toho, jaké napájecí napětí zvolit. Pokud bychom zvolili příliš vysoké, bude docházet k zahřívání tenzometrů a pokud nízké, snižovali bychom citlivost. Lze říci, že pro tenzometry ve standardním provedení 120Ω je vhodné použít napětí do 5V a pro tenzometry s hodnotou odporu 350Ω a více je možno využít napětí 10V.



Obr. 30 Princip funkce tenzometru (vpravo po zatížení)

Hodnota změny odporu závisí na následujících parametrech:

- prodloužení délky vodiče,
- zmenšení průřezu vodiče (kontrakce),
- změně měrného odporu.

Je velmi obtížné určit tyto hodnoty běžným měřením, proto je výrobci tenzometrů nahrazují součinitelem k (tzv. konstanta tenzometru) a tento lze poté odečíst na jejich obalu nebo v příložené dokumentaci. Konstantu tenzometru lze vypočítat podle vztahu (6), ve skutečnosti je však získána experimentálně.

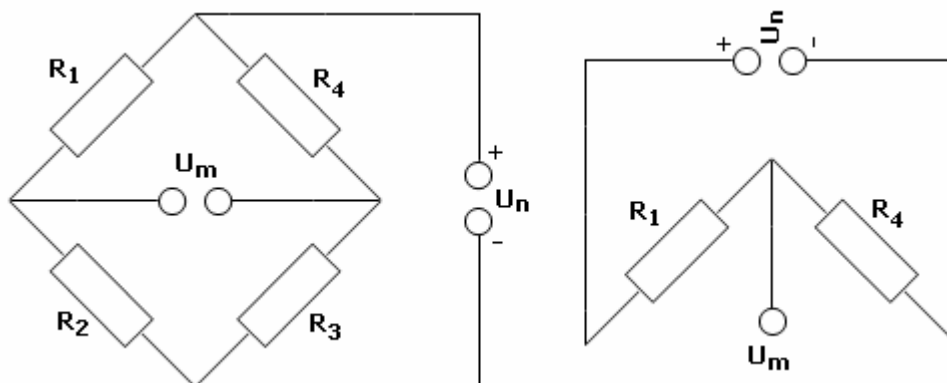
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (16)$$

ΔR ...změna odporu tenzometr	[Ω]
R ....odpor tenzometru na počátku	[Ω]
Δl....změna délky tenzometru	[mm]
l.....délka tenzometru na počátku	[mm]
k ...konstanta tenzometru	[-]
ε....konstanta tenzometru	[-]

Ačkoliv se může na první pohled zdát, že měření pomocí tenzometrů je jednoduché, není tomu tak úplně pravda. Je potřeba splnit řadu podmínek, aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot. Tyto podmínky jsou rozebrány níže.

Zapojení tenzometru

Nejjednodušší variantou je použití tenzometru jako běžného odporu, což v podstatě tenzometr je. Slabinou tohoto zapojení je malá citlivost a hlavně samotné změření rozdílu odporu či protékajícího proudu, jelikož měřidla nejsou k tak malé změně uzpůsobena. Toto zapojení se v praxi nepoužívá. Využívá se však zapojení do Wheatstonova můstku (Wheatstone bridge), který zdvojnásobuje citlivost a zároveň nám umožňuje měřit změnu napětí. Tuto změnu, která je v řádu milivoltů, jsme následně schopni zesílit na hodnotu několika voltů a změřit ji běžnými voltmetry. Rozeznáváme Wheatstonův můstek plný a můstek poloviční.



Obr. 31 Wheatstonův můstek plný (vlevo) a poloviční (vpravo)

Plný můstek se skládá ze čtyř tenzometrů zapojených podle schématu na obr. 31. Princip je následující, pokud jsou všechny odpory naprosto stejné, tak se na měřících svorkách indikuje nulové napětí. Jakmile však dojde ke změně odporu v jakékoliv větvi, vytvoří se v měřící úhlopříčce napětí a začne jí protékat proud. Napětí se generuje na základě vztahu (17): pro představu uvedu i příklad, kdy dojde ke změně odporu R_1 ze 120Ω na $120,3\Omega$ při napájecím napětí $5V$. Pomocí zesilovače jsme schopni toto napětí zvýšit až $5000\times$ a následně bez problémů změřit a porovnat s referenčním napětím.

$$U_m = U_n \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (17)$$

$$U_m = 5 \cdot \frac{120,3 \cdot 120 - 120 \cdot 120}{(120,3 + 120) \cdot (120 + 120)} = 0,00312V$$

U_n ...napájecí napětí [V]

U_m ...napětí na měřící úhlopříčce [V]

R_1 ...odpor tenzometru [Ω]

$R_{2,3,4}$...velikost odporu ve zbylých větvích [Ω]

Poloviční můstek je složen ze dvou tenzometrů a dvou teplotně stabilních a přesných odporů již zabudovaných v měřící aparatuře. Výpočty se nijak nemění, jen je zde možnost použít méně tenzometrů.

Kompenzace teploty

Ještě před samotnou aplikací tenzometrů je potřeba si uvědomit, v jakých podmínkách budou pracovat. Největší roli v tomto případě hraje teplota, především její změna. V laboratorních aplikacích při měření ve stacionárním teplotním poli a se stabilní

teplotou měřeného systému není třeba cokoli řešit. Naopak při měření, kdy dochází ke změně teploty, je potřeba tento rozdíl kompenzovat. Již rozdíl jednoho stupně mezi dvěma tenzometry způsobí indikaci falešného napětí a tím i chybu v měření. Toto lze řešit zavedením kompenzačního tenzometru. Tento tenzometr je však nutno umístit na stejný materiál, na kterém se nachází aktivní tenzometr a umístit jej i do stejného teplotního pole. To způsobí, že oba tenzometry se vlivem teploty a rozpínavosti podkladového materiálu deformují stejně a nedochází tím k ovlivnění pouze jednoho z nich.

Samotná teplota tenzometru hraje roli především v jeho odporu, protože všechny vodivé materiály mají jistý teplotní součinitel odporu. Tuto vlastnost lze opět kompenzovat kompenzačním tenzometrem.

Nakonec je třeba brát v potaz i samotné přívodní kabely, které jsou v podstatě také odporem. Tento odpor je však velmi malý. K významnému ovlivnění dochází u vodičů s délkou několika desítek metrů a změně teploty o několik desítek stupňů.

Příčné napětí

Při prodloužení tenzometrů dochází zároveň i k jejich zúžení (kontrakci). To může způsobit zvýšení přechodového odporu v místě příčných připojení. Je proto vhodné použít kvalitní tenzometry s širokými příčnými spoji. U tenzometrů renomovaných výrobců lze příčné napětí zanedbat, chyba takto vzniklá je menší než 0,1%.

Materiály tenzometrů

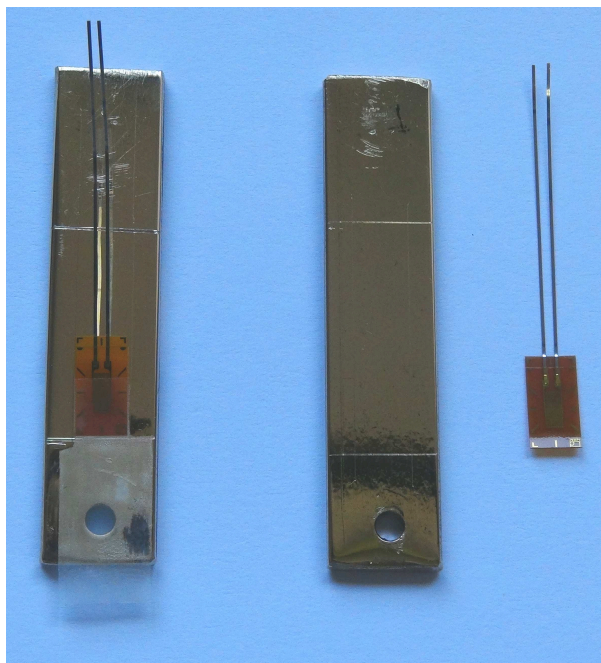
K výrobě foliových tenzometrů se používají materiály s rozličnými vlastnostmi, mezi nejpoužívanější materiály se řadí konstantan. Tento materiál má relativně nízký teplotní součinitel odporu ($0,013\%/^{\circ}\text{C}$) a dobré únavové vlastnosti (při namáhání do $\epsilon=1\%$ až 10^7 cyklů)

Dalším materiálem je izoelastická slitina Vishay. Tato slitina je vhodná především pro čisté dynamické zatížení. Nevýhodou je vyšší teplotní součinitel odporu ($0,1453\%/^{\circ}\text{C}$).

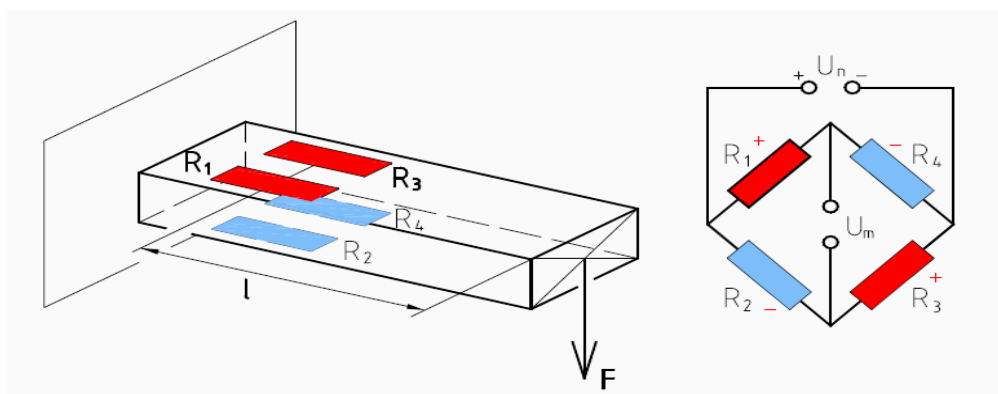
Výborným materiálem pro dlouhá statická zatěžování je tzv. Karma, která vyniká svou vynikající stabilitou. Je proto vhodná pro aplikace, při kterých měříme statickou hodnotu po dobu několika měsíců až let. Tento materiál je také vhodný pro měření za vyšších teplot (krátkodobě až 400°C).

6.2 Aplikace

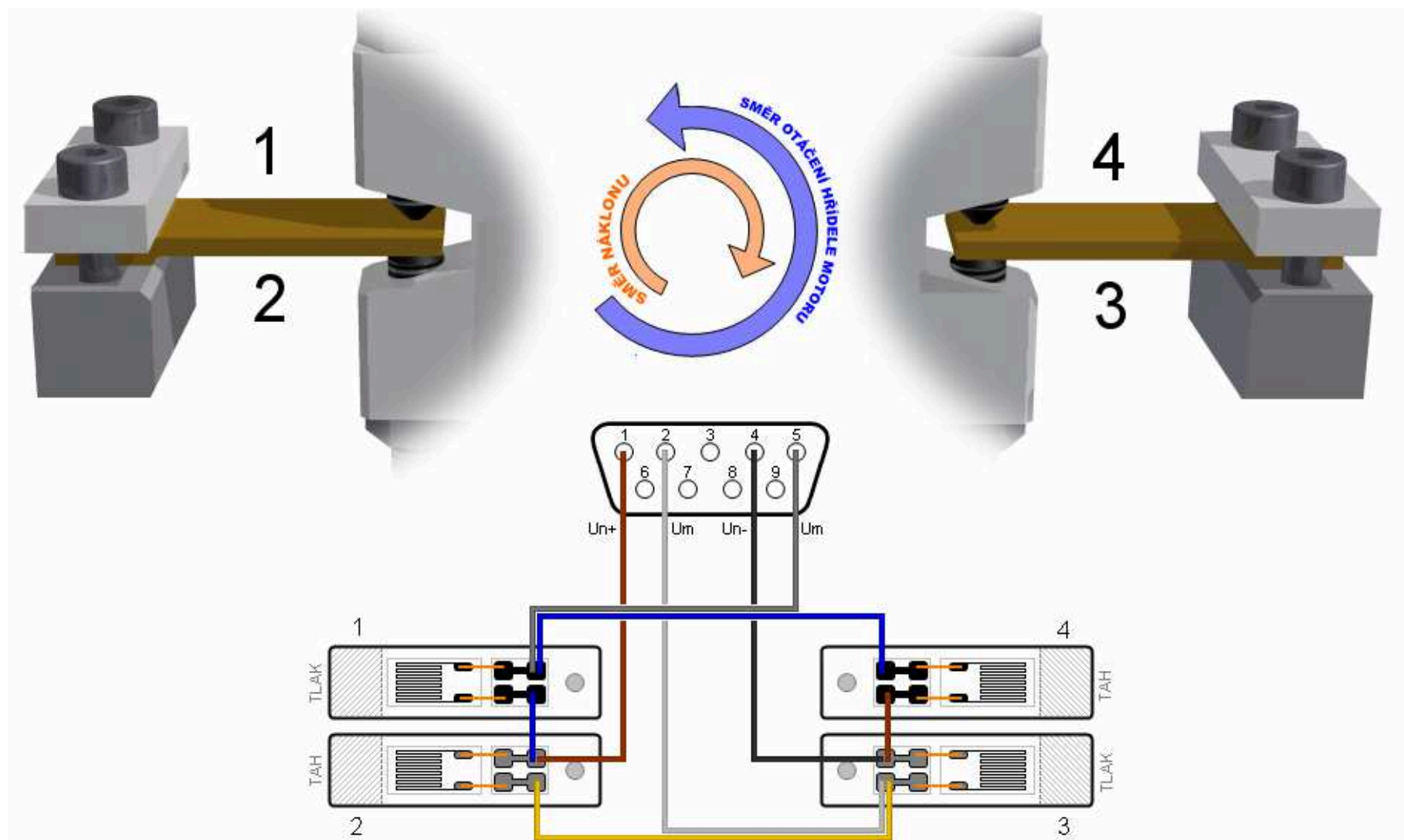
Pro měření byly použity čtyři fóliové tenzometry HBM 1-LY11-3/120A zapojené do plného můstku. Tenzometry mají jmenovitý odpor 120Ω . Vzhledem k tomu, že jsou využity dva měřicí plíšky, bylo nutné tenzometry správně spojit. Vycházel jsem ze zapojení na obr. 33, který znázorňuje zapojení čtyř tenzometrů na jediném plíšku. Podrobné zapojení, zatížení i odpovídající barva použitých drátků je na obr. 34. Oproti obr. 33 jsou tenzometry 1 a 3 namáhány tlakem a tenzometry 2 a 4 tahem. Měřicím zařízením byl speciální osciloskop Yokogawa DL750, umožňující měřit se vzorkovací frekvencí až 1GHz. Vzhledem k omezenému počtu hodnot pro jeden sloupec v programu MS Excel byla zvolena vzorkovací frekvence 5kHz a délka měření 5sec. To znamená 25000 hodnot pro jedno měření.



Obr. 32 Detail lepení tenzometrů na leštěné mosazné plíšky



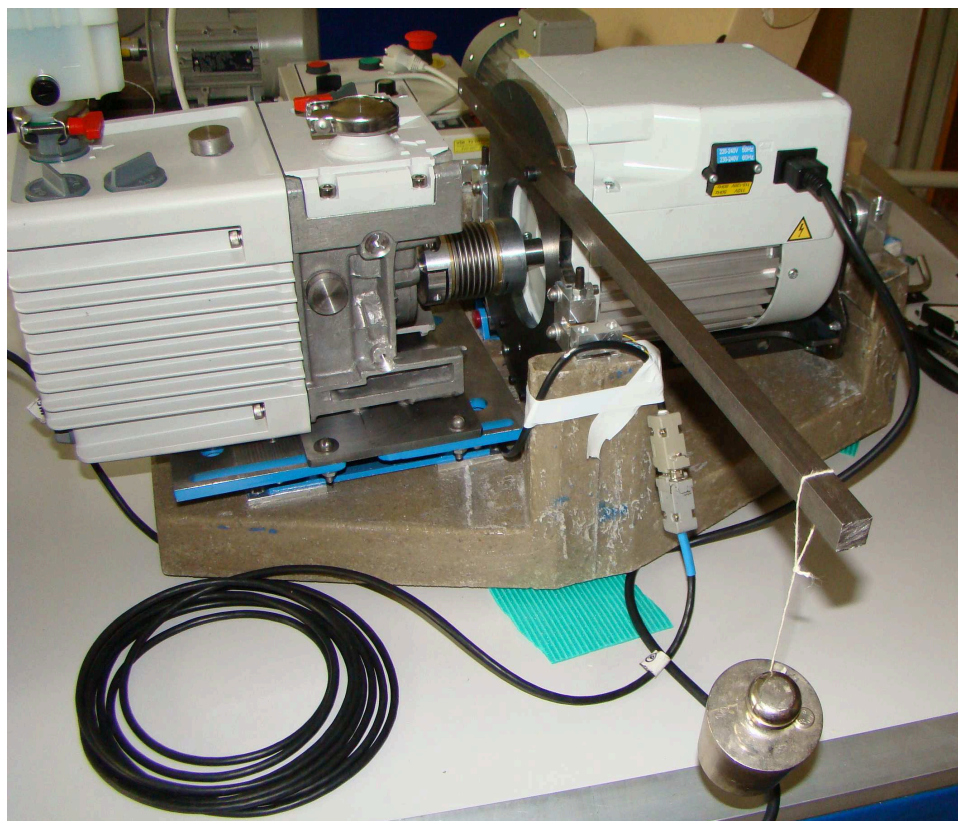
Obr. 33 Zapojení čtyř aktivních tenzometrů při měření ohybu [9]



Obr 34 Podrobný popis zapojení tenzometrických snímačů

6.3 Kalibrace

Správná kalibrace je nezbytná k určení součinitele sloužícího k převodu změřeného napětí na hodnotu kroutícího momentu. Byla zvolena nejjednodušší možná varianta, kterou je zavěšení závaží známé hmotnosti na přesném rameni viz. obr. 35.



Obr. 35 Kalibrace pomocí závaží

Po vynulování osciloskopu byla nastavena nulová hodnota napětí (dále jen nula) a následovalo upnutí tyče o hmotnosti 0,829kg s těžištěm ve vzdálenosti od vertikální osy hřídele 158,4mm. Byly provedeny celkem čtyři měření se zavěšenými závažími na rameni 400mm. Výstupem každého z těchto měření byl soubor 25000 hodnot, ze kterých jsem následně stanovil aritmetický průměr a vypočítal součinitel udávající závislost momentu na napětí.

Tab. 4 Tabulka naměřených hodnot při kalibrování

Číslo měření	Hmotnost závaží	Krouticí moment	Průměrné napětí	Převodní součinitel	Průměrný převodní součinitel
	g	Nm	V	V/Nm	V/Nm
1	1000	5,2882	1,789	0,3383	0,338978
2	1001	5,2921	1,793	0,3388	
3	1010	5,3274	1,810	0,3397	
4	1100	5,6806	1,926	0,3390	

Tuto hodnotu $k_p=0,338978$ V/Nm budu nadále používat pro určování momentů.

6.4 Měření

Jako první bylo potřeba si rozmyslet, co je potřeba změřit a jak naměřené výsledky dále zpracovat. Na základě úvahy jsem se rozhodl, že stěžejní je měření rozběhových momentů. Tyto momenty jsou největší, které lze v průběhu provozu naměřit. Základní předpoklad je tedy takový, že jmenovitý výkon elektromotorů bude přibližně stejný, ale že se budou lišit právě ve špičkovém výkonu, který je nezbytný pro rozběh pumpy. Bohužel prozatím byl k dispozici pouze jediný motor a není možno tedy výsledky porovnat.

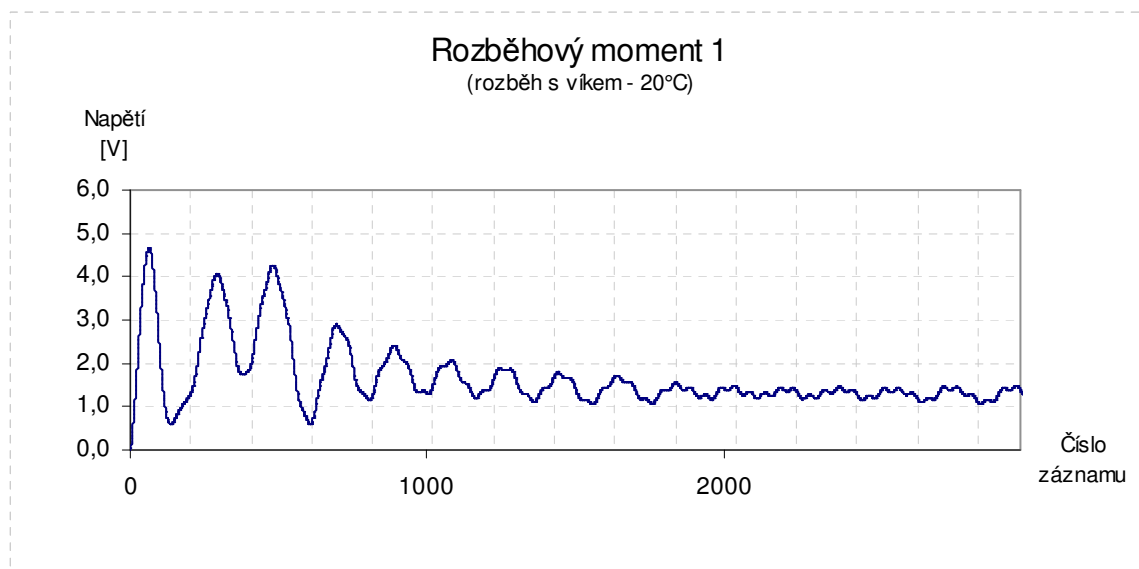
Na počátku, kdy měřená dvojice pumpa-motor nebyla zahřátá, jsem provedl pět měření rozběhů. Během těchto měření bylo nasávání pumpy hermeticky uzavřeno víkem. Došlo tedy pod ním během okamžiku k vytvoření podtlaku. Dále jsem provedl pět měření rozběhů, kdy pumpa nebyla zavíčkovaná. To představuje situaci, kdy dochází k odsávání největšího množství vzduchu. Dále následovalo opětovné uzavření přívodu pumpy a její zapnutí na celkovou dobu 90-ti minut. Během této doby jsem každých pět minut spustil 5-ti sekundové zaznamenávání hodnot (se stále stejnou vzorkovací frekvencí 5kHz). Podle mého odhadu měla pumpa na konci tohoto zátěžového provozu teplotu mezi 60ti až 70ti °C. Poté jsem provedl poslední měření pěti rozběhů.

6.5 Naměřené hodnoty

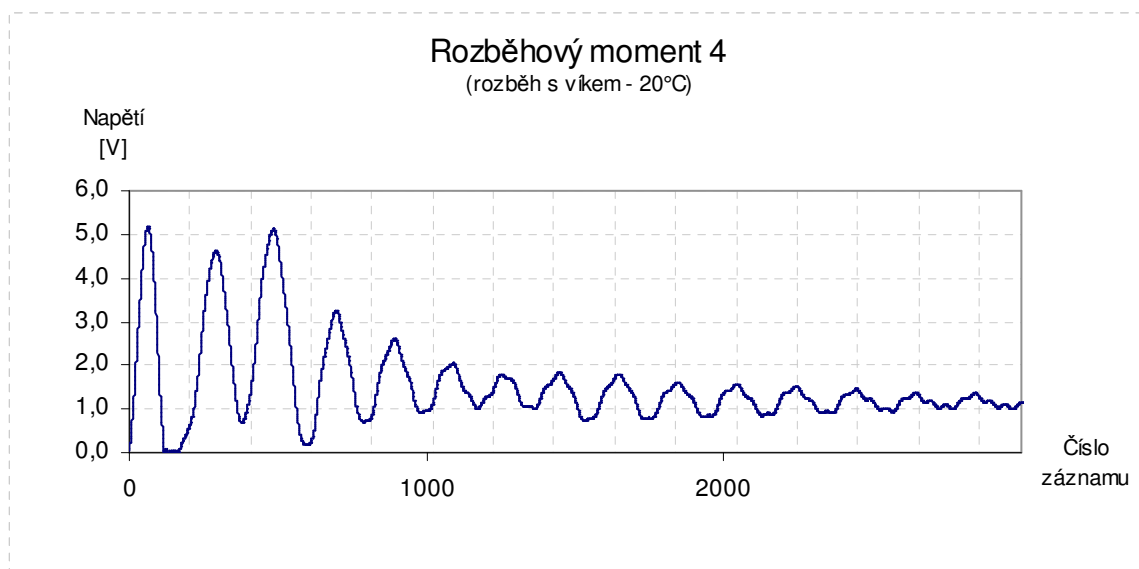
Rozběhy s uzavřeným vstupem

Výpočet střední hodnoty napětí a momentu jsem provedl pomocí funkce Průměr v programu MS Excel. Použito bylo celkem 15000 hodnot (měření dlouhé 3s), přičemž

prvních 5000 hodnot jsem vynechal kvůli nutnosti ustálení hodnot. Stejnou metodiku jsem použil i pro zbylé měření rozběhů.



Obr. 36 Graf prvního měření rozběhu s uzavřeným vstupem – teplota cca 20°C



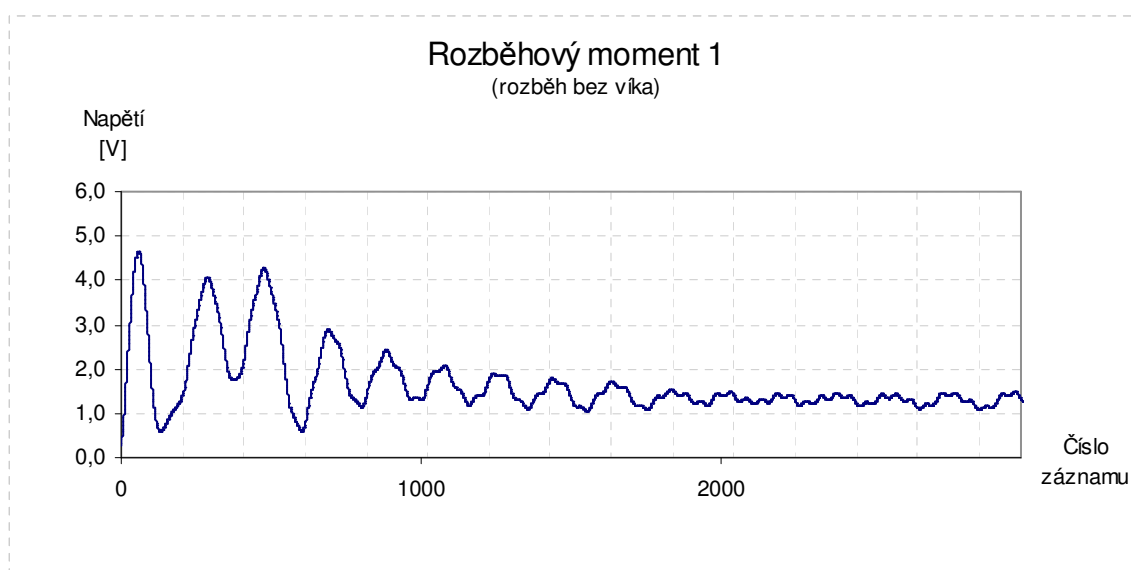
Obr. 37 Graf čtvrtého měření rozběhu s uzavřeným vstupem – teplota cca 20°C

Tab. 5 Průměrné hodnoty rozběhových charakteristik (s víkem, 20°C)

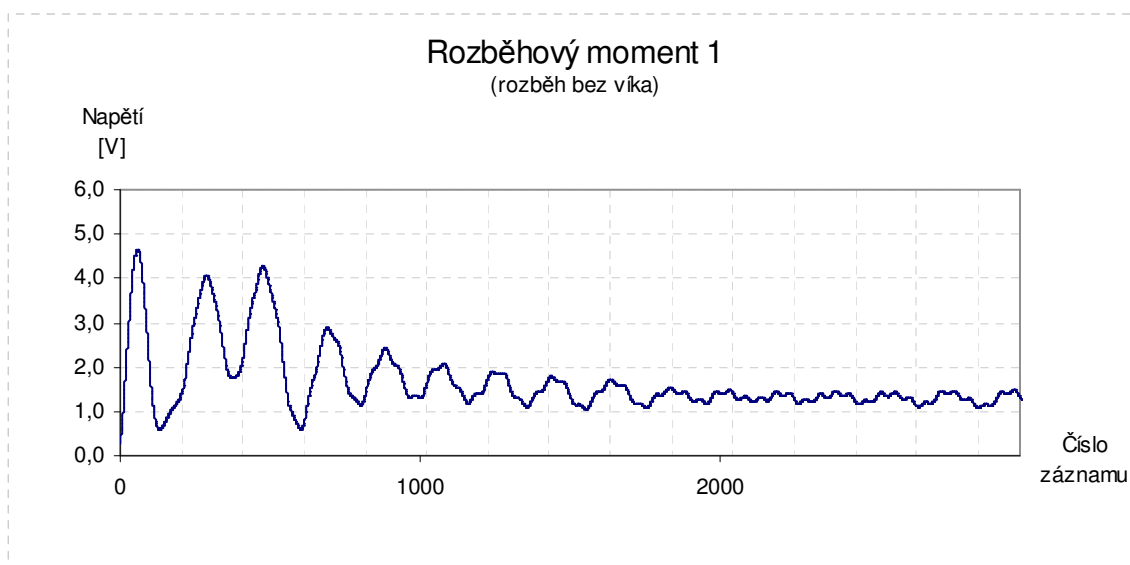
Číslo měření	Nejvyšší hodnota napětí	Nejvyšší hodnota momentu	Průměrná nejvyšší hodnota momentu	Střední hodnota napětí	Střední hodnota momentu	Průměrná střední hodnota momentu
	V	Nm	Nm	V	Nm	Nm
1	4,6529	13,7263	14,9501	1,1888	3,5060	3,2879
2	5,2337	15,4397		1,1439	3,3745	
3	5,1183	15,099		1,1007	3,2472	
4	5,1646	15,2359		1,0807	3,1882	
5	5,1692	15,2495		1,0585	3,1228	

Rozběhy s otevřeným vstupem

Při tomto rozběhu by měl být teoreticky největší průměrný krouticí moment. Je to dáno tím, že pumpa pojme v této chvíli nejvíce možného vzduchu, který následně stlačí a odvede pryč. Naměřené hodnoty tuto teorii potvrdily.



Obr. 38 Graf prvního měření rozběhu s otevřeným vstupem – teplota okolí



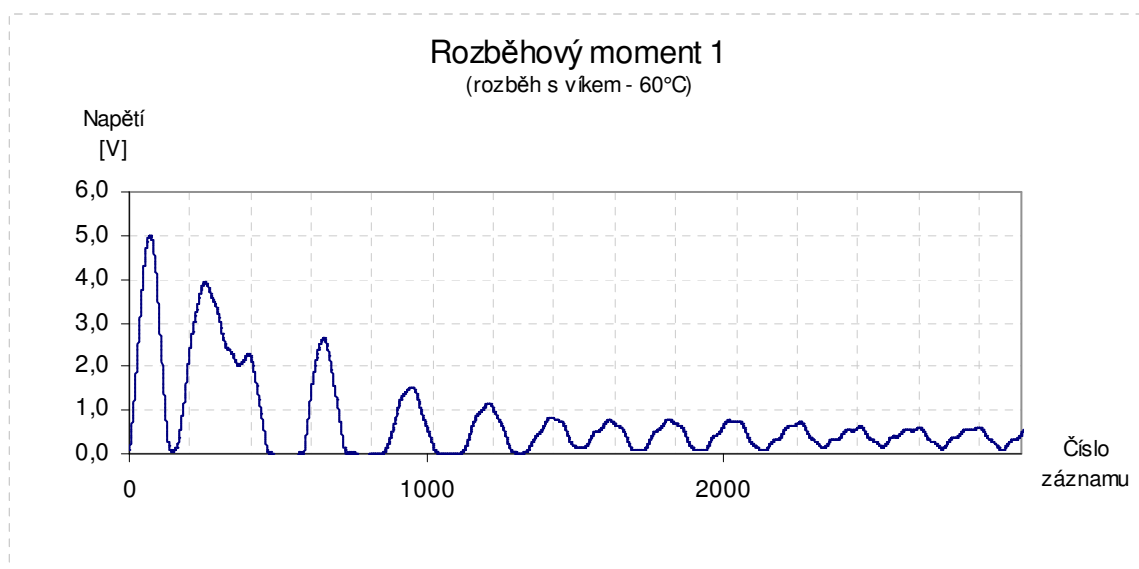
Obr. 39 Graf druhého měření rozběhu s otevřeným vstupem – teplota okolí

Tab. 6 Průměrné hodnoty rozběhových charakteristik (bez víka, 20°C)

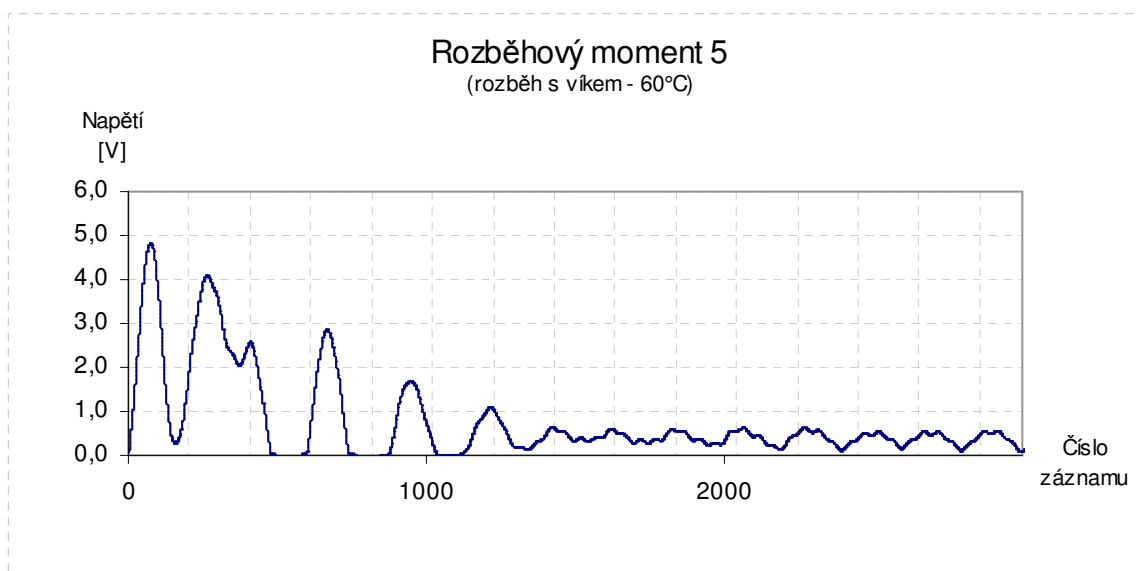
Číslo měření	Nejvyšší hodnota napětí	Nejvyšší hodnota momentu	Průměrná nejvyšší hodnota momentu	Střední hodnota napětí	Střední hodnota momentu	Průměrná střední hodnota momentu
	V	Nm	Nm	V	Nm	Nm
1	4,6529	13,7263	14,9501	1,1887	3,5069	3,2878
2	5,2337	15,4397		1,1438	3,3742	
3	5,1183	15,099		1,1008	3,2474	
4	5,1646	15,2359		1,0806	3,1878	
5	5,1692	15,2495		1,0585	3,1226	

Rozběhy s uzavřeným vstupem za teploty cca 60°C

Po zátěžovém chodu pumpy se posunula hodnota nuly o $\Delta v = 38,23\text{mV}$, proto jsem tuto hodnotu odečetl od všech naměřených hodnot, abych získal přesnější výsledky. Z grafů je patrné, že hodnota kroutícího momentu klesla natolik, že spodní hodnota amplitudy je téměř na nule.



Obr. 40 Graf prvního měření rozběhu s uzavřeným víkem – teplota cca 60°C



Obr. 41 Graf pátého měření rozběhu s uzavřeným víkem – teplota cca 60°C

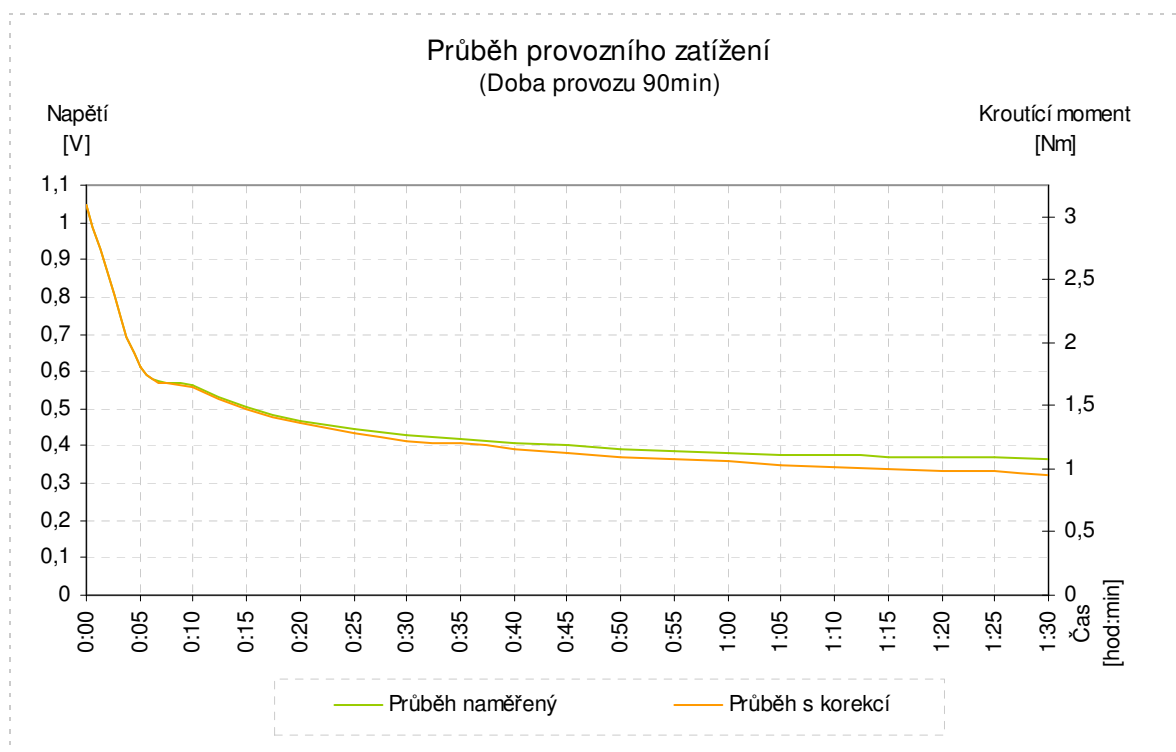
Tab. 7 Průměrné hodnoty rozběhových charakteristik (s víkem, 60°C)

Číslo měření	Nejvyšší hodnota napětí	Nejvyšší hodnota momentu	Průměrná nejvyšší hodnota momentu	Střední hodnota napětí	Střední hodnota momentu	Průměrná střední hodnota momentu
	V	Nm		V	Nm	
1	5,0080	14,7738	14,4268	0,3270	0,9647	0,9278
2	5,3214	15,6984		0,31315	0,9238	
3	4,9597	14,6313		0,31227	0,9212	
4	4,3489	12,8294		0,31306	0,9236	
5	4,8139	14,2012		0,30698	0,9056	

Měření provozní zátěže

Jak už bylo zmíněno, měřicí zařízení bylo v nepřetržitém provozu po dobu 90min. Každých pět minut proběhlo 5-ti sekundové měření se vzorkovací frekvencí 5kHz. Soubor hodnot z každého měření jsem zprůměroval a dostal tak jedinou hodnotu středního momentu. Následně jsem všechny střední hodnoty z každého měření proložil křivkou a vytvořil přehledný graf. V tomto grafu je na hlavní „ypsilonové“ ose naměřené napětí a na vedlejší ose jsou v přesném měřítku umístěny hodnoty pro krouticí moment. K převodu mezi napětím a momentem jsem opět využil součinitel k_p z podkapitoly Kalibrace.

Zároveň bylo potřeba zohlednit posunutí nuly, která se objevila na konci měření. Předpokládám průběžné posouvání nuly během celého měření, a to lineárně. V grafu je toto posunutí zohledněné zkorigovanou křivkou oranžové barvy, zelená pak udává skutečné naměřené hodnoty. Vzhledem k tomu, že měření v čase 00:00 obsahuje i rozběh, vynechal jsem při určování střední hodnoty prvních 7000 hodnot.



Obr. 42 Průběh provozního zatížení

Tab. 7 Průměrné hodnoty měření provozního zatížení

Čas měření	Napětí	Korigované napětí	Moment	Čas měření	Napětí	Korigované napětí	Moment
0:00	1,0464	1,0464	3,0869	0:50	0,3940	0,3728	1,1625
0:05	0,6141	0,6120	1,8116	0:55	0,3884	0,3651	1,1459
0:10	0,5618	0,5575	1,6573	1:00	0,3831	0,3576	1,1302
0:15	0,5029	0,4965	1,4835	1:05	0,3776	0,3499	1,1138
0:20	0,4685	0,4600	1,3822	1:10	0,3744	0,3447	1,1046
0:25	0,4449	0,4342	1,3124	1:15	0,3709	0,3390	1,0941
0:30	0,4277	0,4149	1,2616	1:20	0,3685	0,3345	1,0871
0:35	0,4207	0,4059	1,2411	1:25	0,3698	0,3337	1,0909
0:40	0,4105	0,3935	1,2109	1:30	0,3622	0,3240	1,0686
0:45	0,4021	0,3829	1,1861				

7 Závěr

Ačkoliv se v průběhu návrhu vyskytlo několik komplikací, podařilo se navrhnout měřicí zařízení splňující všechny požadavky, které jsem si před konstrukcí stanovil. Hmotnost celé měřicí stanice se pohybuje pod hranicí 35kg, což umožní i ruční manipulaci. Většinu hmotnosti tvoří polymerbetonový odlitek, který je díky svým vlastnostem ideálním materiálem pro tuto aplikaci.

Díky zapojení v projektu v SGS (studentská grantová soutěž) bylo možno celou stanici vyrobit a prakticky otestovat. Náklady na výrobu byly na hranici dvaceti tisíc korun, převážně díky tomu, že většinu dílů jsme vyráběli svépomocí (včetně lepení a zapojování tenzometrických snímačů). K výrobě byly použity cenově dostupné technologie, jakými jsou vypalování plechů laserem, soustružení, vrtání a svařování. Ke spojování byly využity téměř výhradně normalizované součásti. Jelikož se jedná o prototyp, nebyly použity téměř žádné povrchové úpravy k ochraně proti korozi. Tyto úpravy jsou však pro ostrý provoz nezbytné, protože není žádoucí kontaminovat měřicí prostředí drobnými částicemi korodující oceli. Toto se týká především ložisek, které nejsou nijak kryty.

Pro testování byla místo brzdy využita zapůjčená vakuová pumpa, která poslouží také ke zjištění průběhu zátěže. Podle ní bude v budoucnu možno sestavit brzdu s podobnou brzdou charakteristikou. Ke spojení motoru a brzdy slouží vlnovcová spojka, vyrovnávající případné montážní nepřesnosti. Konstrukce však umožňuje použít více druhů a velikostí spojek pro určení, do jaké míry tyto spojky ovlivní průběh zatížení. Doporučuji provést i několik měření se spojkou určenou k měření kroutícího momentu. Bude tak možno získat v podstatě účinnost měřicí stanice. Dokud tato účinnost nebude stanovena, může stanice sloužit pouze k porovnávání momentů jednotlivých motorů.

Z měření vyplývá, že hodnota špičkového výkonu je přibližně pětikrát vyšší než je jmenovitý výkon. Je také zajímavé, že na velikost rozběhového momentu nemá vliv to, zda je vstup pumpy hermeticky uzavřen či nikoliv. Toto je však nutno potvrdit více měřeními s různými motory.

Dlouhodobé měření průběhu zatěžování ukázalo, že střední hodnota napětí s délkou chodu klesá. To je způsobeno ohřevem pumpy, vytvořením vakua a změnou vlastností olejové náplně. Měření také potvrdilo, že zařízení umožňuje měřit hodnoty v celém rozsahu momentu motoru.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] RV12 114/230V, 1-ph, 50/60Hz, Factory set to 230V for Europe. *Edwards-Vacuum Pumps and Abatement Technology: Vacuum pump service, Repairs, Refurbishments, Spares* [online]. c2012 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=A65501903>
- [2] 8645/46 Levný rotační snímač momentu. *Kalibrační přístroje, Měřicí přístroje, Průmyslová automatizace* [online]. c2012 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.meatest.cz/produkty-8645-46-levny-snimac-momentu-detail-83>
- [3] Polymerbeton. In: *Www.C-N-C.cz: hobby cnc mašinky a jiné domácí cnc projekty - každý den nové informace* [online]. 2008-02-15 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=49&t=750&start=75>
- [4] Polymerbeton. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012, 2011-09-07 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polymerbeton>
- [5] CHS-Epoxy 455. *Spolchemie: Aplikační list* [online]. 2011, 2007 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.chemex.cz/default.aspx?process=download/Files/Documents/podlaharske-produkty/epoxidova-pryskyrice/E455.pdf>
- [6] BETOSAN - Systémy na bázi epox. pryskyřic - BETOSAN s.r.o.: BETOFIL FH DSH. *BETOSAN* [online]. c2011, 2011-05-31 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: http://eshop.betosan.cz/stavebniny/systemy-na-bazi-epox_-pryskyric/betofil-fh-dsh.htm
- [7] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře : Části spojovací*. Ostrava : VŠB-TU, 2008. 91 s. ISBN 978-80-248-1290-8
- [8] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Třetí doplněné vydání. Úvaly: ALBRA, 2006. 913 s. ISBN 80-7361-033-7
- [9] FOLTA, Zdeněk. *Odporová tenzometrie*. Ostrava, Leden 2009

9 Seznam příloh

Příloha A – Výsledky měření rozběhových momentů s víkem, 20°C

Příloha B – Výsledky měření rozběhových momentů bez víka, 20°C

Příloha C – Výsledky měření rozběhových momentů s víkem, 60°C

Příloha D – Fotodokumentace z výroby

Příloha E – Kompletní výkresová dokumentace

DP2012-FOU024-0.0	Měřicí stanice
DP2012-FOU024-1.0	Nosný rám
DP2012-FOU024-1.1.0	Svařenec rámu
DP2012-FOU024-1.1.1	Výpalek 1
DP2012-FOU024-1.1.2	Výpalek 2
DP2012-FOU024-1.1.3	Výpalek 3
DP2012-FOU024-1.1.4	Výpalek 4
DP2012-FOU024-1.1.5	Výpalek 5
DP2012-FOU024-1.1.6	Výpalek 6
DP2012-FOU024-1.1.7	Výpalek 7
DP2012-FOU024-1.1.8	Výpalek 8
DP2012-FOU024-1.1.9	Výpalek 9
DP2012-FOU024-1.2	Úchyt snímače 1
DP2012-FOU024-1.3	Základna ložiska
DP2012-FOU024-1.4	Základna brzdy
DP2012-FOU024-2.0	Kyvná část
DP2012-FOU024-2.1.0	Zadní patka
DP2012-FOU024-2.1.1	Výpalek 10
DP2012-FOU024-2.2.0	Střední nosník
DP2012-FOU024-2.2.1	Výpalek 11
DP2012-FOU024-2.2.2	Výpalek 12
DP2012-FOU024-2.2.3	Výpalek 13
DP2012-FOU024-2.3	Přední příruba
DP2012-FOU024-2.4	Úchyt snímače 2
DP2012-FOU024-2.5	Kolík

DP2012-FOU024-3.0	Podstavec
DP2012-FOU024-3.1	Výpalek 14
DP2012-FOU024-3.2	Výpalek 15
DP2012-FOU024-3.3	Výpalek 16
DP2012-FOU024-3.4	Výpalek 17
DP2012-FOU024-4.0	Ložiskový domek
DP2012-FOU024-4.1	Domek spodní
DP2012-FOU024-4.2	Domek horní
DP2012-FOU024-5	Přítlačná deska
DP2012-FOU024-6	Ložiskový čep
DP2012-FOU024-7	Připojovací deska
DP2012-FOU024-8	Vymezovací podložka
DP2012-FOU024-9	Měřicí plíšek

Příloha F – Nosič CD s následujícím obsahem:

- diplomová práce s přílohami
- 3D model zařízení ve formátu .stp
- kompletní výkresová dokumentace ve formátu .pdf
- poster

Poděkování

Děkuji Ing. Tomáši Kubínovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a za pomoc při výrobě zařízení.

Děkuji také doc. Ing. Zdeňku Foltovi, Ph.D. za zapůjčení měřicího zařízení Yokogawa a cenné rady z oblasti tenzometrie.